

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra metalurgie a slévárenství

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Technologie lití kotlového článku.

Casting technology boiler section.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra metalurgie a slévárenství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Dalibor Piekar**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T033 Slévárenské technologie
Téma: **Technologie lití kotlového článku**
Casting Technology Boiler Section

Zásady pro vypracování:

1. Literární rozbor technologie tenkostěnných odlitků
2. Návrh a výpočet vtokové soustavy odlitku
3. Verifikace návrhu technologie s využitím simulace
4. Odlití zkušebního odlitku
5. Vyhodnocení navržené technologie
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VONDRÁK, V. a kol. *Vtokové soustavy a nálitkování*. VŠB-TU Ostrava, 2005.
- [2] NEUMANN, F. *Gusseisen*, Renningen-Malmsheim: expert-verlag, 1999, ISBN 3-8169-1728-3.
- [3] OTÁHAL, V. *Tvárná litina*, <http://otahalconsult.cz/ukazky-produktu/tvarna-litina/>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Hampl, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: **prof. Ing. Tomáš Elbel, CSc.**

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



prof. Ing. Karel Michalek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

- ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.
- ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.
- ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).
- ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.
- ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.
- ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.
- ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:
- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
 - Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
 - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně věnovat do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 20.4.2015


.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Touto cestou bych rád vyjádřil poděkování doc. Ing. Jiřímu Hamplovi, Ph.D., za odbornou pomoc, připomínky a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat kolegyni z úseku technologie Ing. Anetě Vaňkové za dodání podkladů k této diplomové práci a spolupráci při jejím řešení.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na optimalizaci vtokové soustavy tenkostěnného odlitku kotlového článku U 28 střední z litiny s lupínkovým grafitem vyrobeného metodou gravitačního lití do pískových forem. Pomocí numerické simulace s využitím programu MAGMA 5.2 s modulem Magma Iron byla analyzována současná technologie výroby. Na základě simulací byly určeny možné příčiny vzniku vad v odlitku. Byla navržena nová vtoková soustava, včetně úpravy formovací směsi. Nová technologie odlévání kotlového článku byla zavedena do výroby.

Klíčová slova: Litina, kotlový článek, simulace

Abstract

This thesis deals with optimization of gating system for thin-walled casting of a middle segment of a boiler U28 made of grey cast iron produced by gravity casting process. The current state was numerically simulated in MAGMA 5.2 with “Magma Iron” module. Based on the simulation few possible causes of defects in casting were found. A new gating system was designed including some changes to the moulding mixture. This newly optimized procedure of casting was applied in production.

Keywords: Cast iron, boiler segment, simulations

Obsah

	ÚVOD	1
1	LITERÁRNÍ ROZBOR TECHNOLOGIE TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ ..	2
1.1	Obecná definice litin.....	2
1.1.1	Rozdělení litin podle struktury	3
1.1.2	Grafitické litiny	4
1.1.3	Karbidické litiny	5
1.1.4	Litina s lupínkovým grafitem.....	5
1.2	Vtoková soustava odlitků	8
1.2.1	Druhy vtokových soustav podle rychlosti lití	8
1.2.2	Prvky vtokové soustavy	8
1.2.3	Základní výpočty vtokových soustav	9
1.2.4	Výpočet doby lití.....	10
1.2.5	Výpočet střední lící výšky (tlakové výšky).....	10
1.2.6	Výpočet řídicího průřezu vtokové soustavy.....	11
1.2.7	Výpočet struskového kanálu	11
1.2.8	Výpočet průměru vtokového kůlu.....	11
1.3	Popis nejčastějších vad tenkostěnných odlitků ve slévárně Viadrus a.s. za určité sledované období	12
1.3.1	Nezaběhnutí	12
1.3.2	Zavaleniny.....	12
1.3.3	Bubliny.....	13
1.3.4	Zahlcený plyn.....	13
1.3.5	Odvařeniny od formy - jádra.....	13
1.3.6	Povrchové připečeniny	14
1.3.7	Zadrogeniny	14

1.4	Využití výpočetní techniky k simulacím lití a tuhnutí	14
1.4.1	Matematické metody řešení numerických simulací	15
1.4.2	Rozdělení numerických metod	16
2	NÁVRH A VÝPOČET VTOKOVÉ SOUSTAVY	17
2.1	Výpočet vtokové soustavy	20
2.1.1	Doba lití	20
2.1.2	Výpočet střední tlakové výšky	20
2.1.3	Výpočet minimálního průřezu vtokové soustavy	21
2.1.4	Určení druhu vtokové soustavy dle rychlosti lití	21
2.1.5	Výpočet struskového kanálu	21
2.1.6	Výpočet průměru vtokového kůlu	21
2.2	Porovnání vypočítaných a stávajících parametrů vtokové soustavy	22
3	VERIFIKACE NÁVRHU TECHNOLOGIE S VYUŽITÍM SIMULACE	23
3.1	Nastavení základních parametrů simulace	23
3.1.1	Tvorba geometrie	23
3.1.2	Tvorba sítě	23
3.1.3	Nastavení počátečních a okrajových podmínek	24
3.1.4	Nastavení výpočtu	25
3.1.5	Spuštění simulace	26
3.1.6	Kontrola vypočtených výsledků	26
3.2	Úprava vtokové soustavy a odvzdušnění formy	26
4	VÝROBNÍ AGREGÁTY POUŽITÉ K VÝROBĚ ODLITKU	28
4.1	Výroba tekutého kovu	28
4.2	Výroba jader metodou Cold - Box	28
4.3	Formovací směs	30
4.4	Formovna	30

4.5	Odlévání tekutého kovu.....	30
5	ODLITÍ ZKUŠEBNÍHO ODLITKU	31
5.1	Kontrola odvzdušnění formy a obměna vtokových soustav.....	32
5.2	Kontrola technologických vlastností formovací směsi.....	34
5.3	Technologické změny ve formovací směsi	34
5.4	Navržení odvzdušnění jádra při lití kotlového článku.....	35
5.5	Nalezení optimálnějších alternativ k výrobě jádra kotlového článku.....	36
5.5.1	Plynotvornost jader a formovacích směsí	36
5.5.2	Vyhodnocení vzorků jader	37
5.6	Optimalizace dávky pojiv na vstřelovacích strojích Cold-Box.....	38
5.7	Výměna ostřiva pro výrobu jader metodou Cold-Box	39
5.8	Prezentace výsledků ze zkoušky výměny ostřiva.....	39
6	VYHODNOCENÍ NAVRŽENÉ TECHNOLOGIE	41
7	ZÁVĚR	42
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	44
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	46
	SEZNAM TABULEK	48

ÚVOD

S rychle rozvíjejícím se nárůstem počítačové techniky, si mohou konstruktéři a technologové vypomoci numerickými simulacemi pro odlévání a tím se vyvarovat některých vad v odlitcích, ještě před finálním spuštěním konkrétních výrobků do sériové výroby. [13]

Cílem této diplomové práce je návrh nové technologie lití středního kotlového článku U 28 střední. Nový způsob technologie lití bude navržen pomocí numerické simulace odlévání a tuhnutí odlitků. K samotnému výpočtu byl použit simulační program Magma 5.2 s modulem Magma Iron, který vyvinula německá firma ©MAGMA Giessereitechnologie GmbH. Tyto výsledky budou ověřeny odlitím kontrolních odlitků se zavedením nové technologie lití do sériové výroby. Součástí navržené technologie lití je i analýza a úprava nevhodného složení jádrové a formovací směsi.

Dále bude blíže rozveden nový problém, který vznikl po 8. měsících výroby s touto nově navrženou technologií. Hledáním příčin s nestabilitou výroby kotlového článku a následnou zvýšenou neshodnou výrobou, bude poukázáno na více aspektů, které jsou spjaté s celkovou technologií výroby již zmíněného kotlového článku.

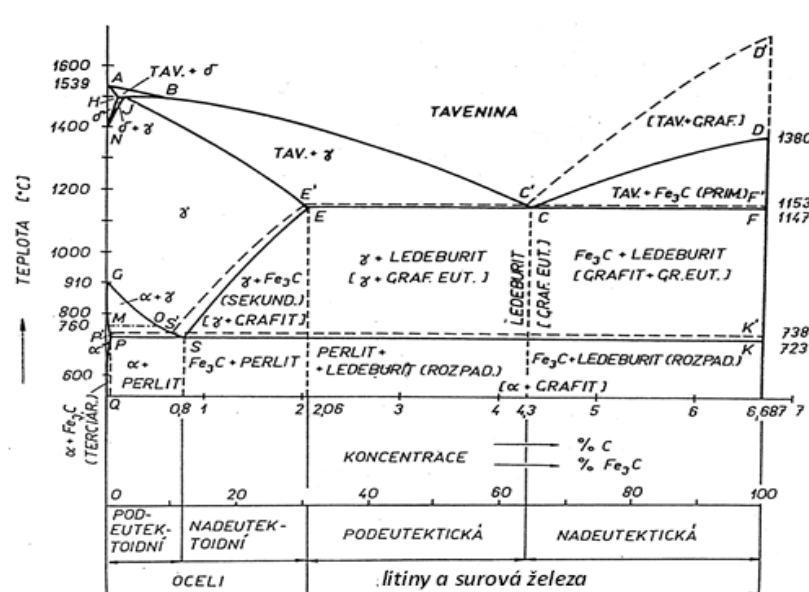
1 LITERÁRNÍ ROZBOR TECHNOLOGIE TENKOSTĚNNÝCH ODLITKŮ

V podniku VIADRUS a.s. se pro výrobu tenkostěnných litinových odlitků používá litina s lupínkovým grafitem odlévána gravitačním litím do bentonitových forem. Litina s lupínkovým grafitem je velice progresivní materiál s řadou výhod oproti jiným materiálům. Její nižší lící teplota v porovnání s ocelí na odlitky má příznivý vliv na jakost povrchu odlitku a neklade velké požadavky na formovací materiály. Také výborná zabíhavost tohoto materiálu umožňuje odlévání i tvarově komplikovanějších tenkostěnných odlitků. Mezi klady patří nízká výrobní cena, která je důležitým ekonomickým faktorem při posuzování materiálu k výrobě odlitků. Další výbornou vlastností šedé litiny, která má souvislost s formou vyloučeného grafitu je výborná schopnost tlumení vibrací. [7] Neméně významnou vlastností je také nízká vrubová citlivost. [22]

1.1 Obecná definice litin

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších prvků, v nichž je uhlík vyloučen jako grafit nebo vázán jako karbid Fe_3C , případně karbid jiného prvku. Obsah uhlíku v litinách je vyšší, než odpovídá jeho maximální rozpustnosti v austenitu, více, než 2 % C. [1]

Krystalizace litin může probíhat podle stabilního, nebo metastabilního diagramu Fe-C, resp. Fe- Fe_3C (obr. 1).



Obr. 1 Rovnovážný diagram Fe - C ----- Fe - Fe_3C

Základní podmínkou pro vznik různých forem krystalizace je nejen chemické složení, ale také rychlost ochlazování, které je velmi závislé na tloušťce stěny a tepelné akumulaci formy.

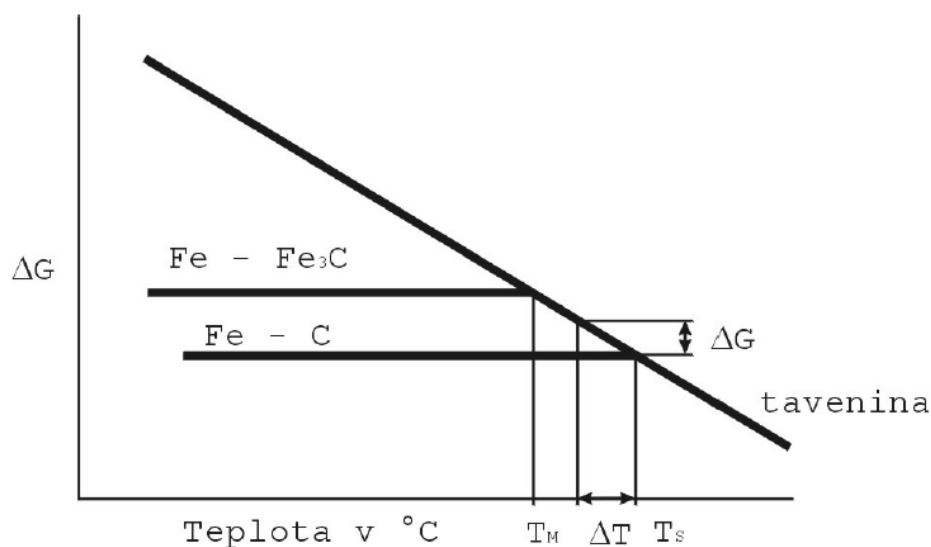
1.1.1 Rozdělení litin podle struktury

Struktura litin je vždy tvořena primární fází a eutektikem.

Při tuhnutí podle stabilního diagramu Fe-C vzniká grafitické eutektikum, které tvoří austenit a grafit. Tyto litiny se nazývají litiny grafitické. Grafitické litiny tvoří drtivou většinu všech odlévaných litin.

Při tuhnutí podle metastabilního systému je eutektikem ledeburit. Ledeburit je tvořen austenitem a cementitem Fe_3C . Ve struktuře není přítomen žádný volný grafit a takové litiny se nazývají bílé, nebo karbidické. Karbidické litiny se vyznačují vysokou tvrdostí, křehkostí a jsou téměř neobrobitelné. [1]

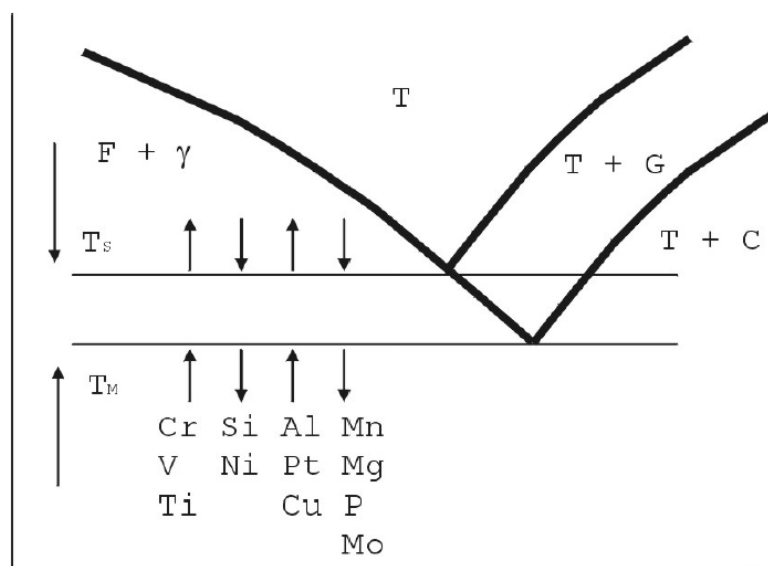
Podmínky k vytvoření grafitického nebo ledeburitického eutektika závisí na termodynamických a kinetických podmínkách krystalizace. [16] Termodynamické podmínky stabilní a metastabilní soustavy jsou dány změnou volné energie ΔG (obr. 2). Teplota stabilního rovnovážného eutektika se pohybuje okolo 1153°C , metastabilního 1147°C . [11]



Obr. 2 Vliv podchlazení na krystalizaci litiny [11]

Pro grafitizační schopnost litiny je rozhodující rozmezí mezi stabilní a metastabilní teplotou.

Interval mezi stabilní a metastabilní teplotou ovlivňuje také přítomnost dalších prvků v litině (obr. 3).



Obr. 3 Ovlivnění poloh T_s a T_m přítomností prvků v litině [11]

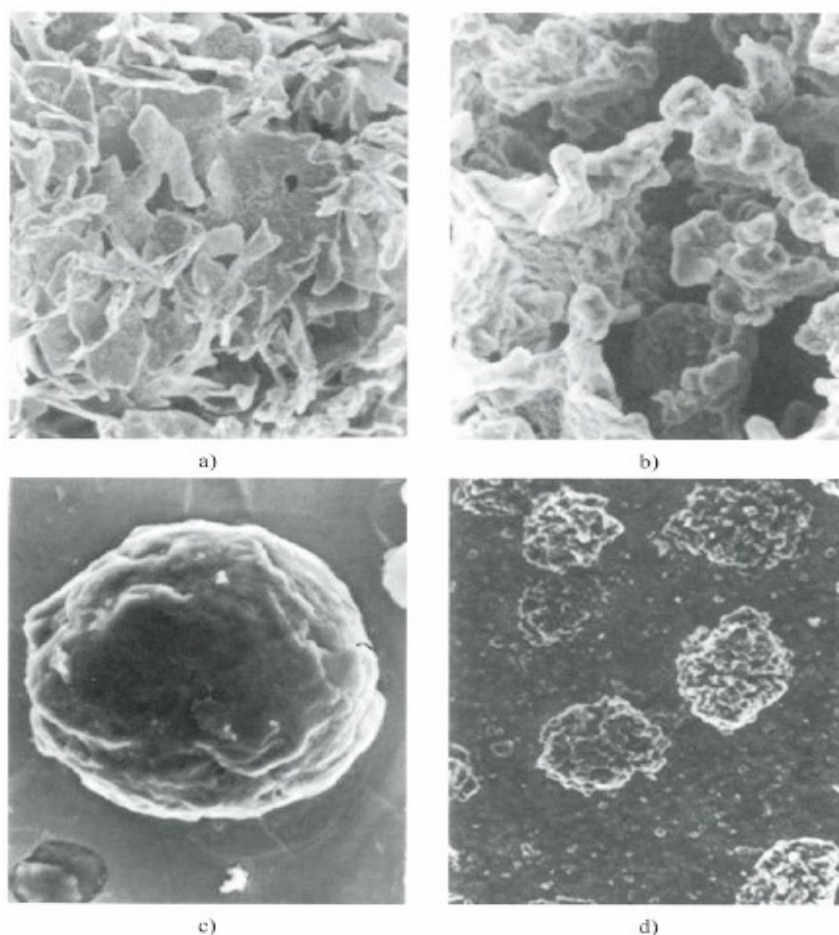
Prvky, které svou přítomností budou rozšiřovat interval teplot mezi T_s a T_m , podporují grafítizaci a naopak. [11]

1.1.2 Grafitické litiny

Strukturu grafitických litin tvoří základní kovová hmota (matrice), v níž je přítomen grafit. Vlastnosti grafitických litin ovlivňuje, druh matrice, velikost, tvar, množství a rozložení grafitu. [17]

Základní podmínkou pro určení druhu litiny je tvar vyloučeného grafitu. Podle tvaru vyloučeného grafitu rozdělujeme litiny na tyto následující typy.

- Litina s lupínkovým grafitem - LLG (obr. 4a)
- Litina vermikulární – LVG (obr. 4b)
- Litina s kuličkovým grafitem – LKG (obr. 4c)
- Temperovaná litina – TL (obr. 4d)



Obr. 4 Tvar grafitu v litinách, hluboké leptání, REM [9]

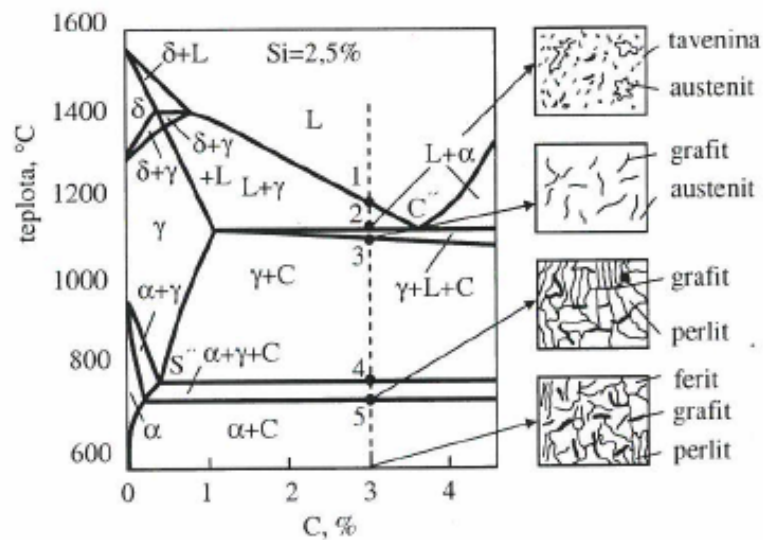
1.1.3 Karbidické litiny

Grafit je zcela nebo částečně vázán jako karbid železa, manganu, chromu, molybdenu a dalších karbidotvorných prvků. Karbidické litiny mají vysokou tvrdost a ořezuvzdornost. [1]

1.1.4 Litina s lupínkovým grafitem

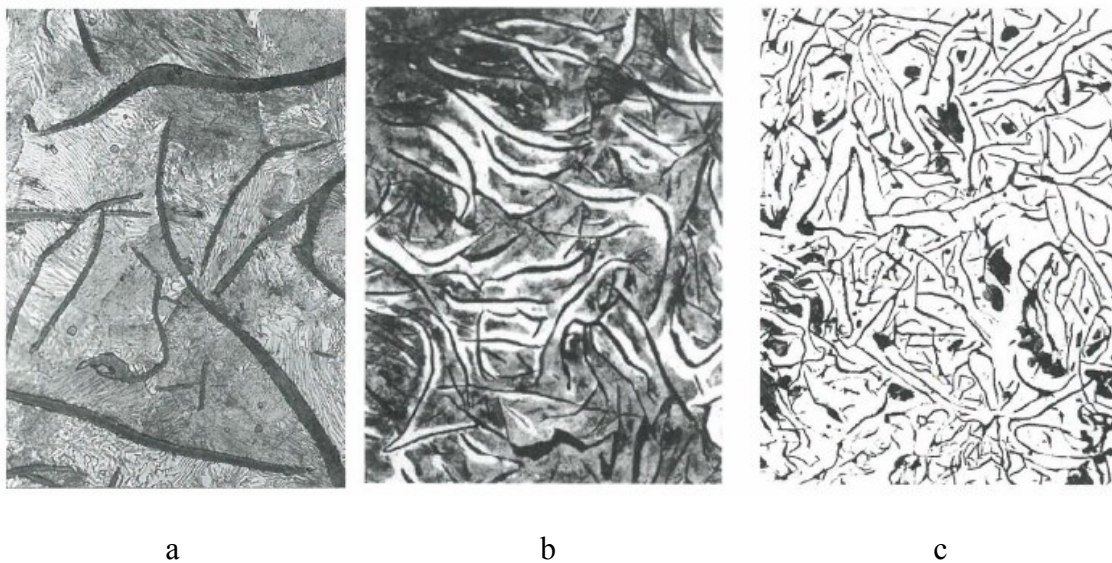
Krystalizace litiny s lupínkovým grafitem, nazývané také šedou litinou probíhá podle stabilní soustavy železo – grafit ve velmi ohraničené míře.

Pro bližší vysvětlení tohoto procesu je vhodnější použít řez ternární soustavou Fe – C – Si (obr. 5). Krystalizace podle této soustavy začíná vyloučením austenitu (fáze 1-2). Následuje eutektická reakce (fáze 2-3), snížení uhlíku v austenitu (fáze 3-4) a posléze eutektoidní reakce (fáze 4-5). [9]



Obr. 5 Řez ternární soustavou Fe – C – Si pro obsah 2,5% Si [9]

Výsledná struktura může mít: perlitickou (obr.6a), perliticko – feritickou (obr.6b), nebo feritickou (obr.6c) kovovou matici a lupínkový grafit.



Obr. 6 Mikrostruktury litiny s lupínkovým grafitem [9]

Primární krystalizace nám předurčuje rozložení grafitu, protože vymezuje prostor pro krystalizaci eutektika, při které vznikají částčky grafitu. [9] Vzájemný způsob provázanosti dendritu primárního austenitu a eutektických buněk ovlivňuje vlastnosti litiny.

Podíl taveniny, která bude tuhnout primární krystalizací, nebo eutekticky, závisí na chemickém složení, protože obsah doprovodných a přísadových prvků ovlivňuje i polohu eutektického bodu.

Vliv jednotlivých prvků lze vypočítat dle autora [11] pomocí stupně eutektičnosti - Sc ze vzorce 1.

$$Sc = \frac{\% C}{4,26 - 0,3 \cdot (\% Si + \% P)} \quad (1)$$

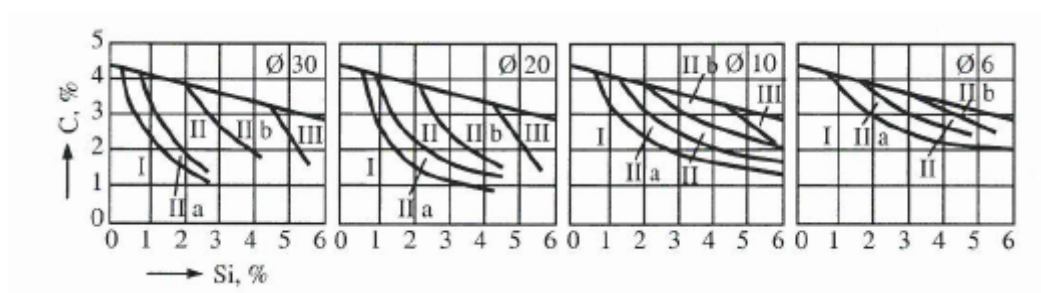
Pokud bude $Sc = 1$ půjde o eutektickou litinu

Pokud bude $Sc < 1$ půjde o podeutektickou litinu

Pokud bude $Sc > 1$ půjde o nadeutektickou litinu

Druh i skladba struktury litin jsou funkcí nejen chemického složení, ale také podmínek tavení a zpracování taveniny před litím, licí teploty a zejména podmínek chladnutí. Proto důležitou roli hraje velikost odlitku, tloušťka jeho stěn, tepelná vodivost stěn formy apod.[13] Souvislost mezi chemickým složením, rychlosti ochlazování a očekávanou strukturou můžeme vyjádřit pomocí tzv. strukturních diagramů.[12]

Na obrázku 7 jsou strukturní diagramy podle Uhlitsche a Weichelta, které nám znázorňují vliv C a Si na strukturu jednotlivých průměrů odlitků v průběhu ochlazování.



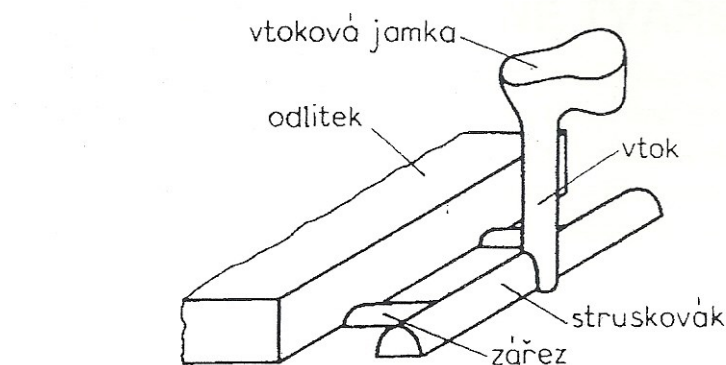
Obr. 7 Strukturní diagramy podle Uhlitsche a Weichelta [13]

K jednotlivým polím jsou přiřazeny tyto struktury:

- I - bílá litina
- II - šedá perlitická
- III - šedá feritická
- II a - litina maková
- II b - šedá feriticko-perlitická [13]

1.2 Vtoková soustava odlitků

Vtokovou soustavu (obr. 8) tvoří systém kanálků, kterými při odlévání proudí veškerý tekutý kov do dutiny formy. Na správném navržení vtokové soustavy závisí, zdali bude odlitek správně odlit bez vad.



Obr. 8 Vtoková soustava odlitku

1.2.1 Druhy vtokových soustav podle rychlosti lití

Vtokové soustavy se dělí podle rychlosti lití na podtlakové a přetlakové.

Podtlaková vtoková soustava

Tekutý kov volně vytéká z nezaplněného zářezu po stěně formy. [2]

$$S_{\text{zářezů}} : S_{\text{struskového kanálu}} : S_{\text{kůlu}} = 1 : 0,83 : 0,7$$

Přetlaková vtoková soustava

Tekutý kov ze zářezů dutiny formy stříká. [2]

$$S_{\text{zářezů}} : S_{\text{struskového kanálu}} : S_{\text{kůlu}} = 1 : 1,1 : 1,1 \text{ nebo } 1,2$$

1.2.2 Prvky vtokové soustavy

- vtoková jamka
- licí kůl
- struskový kanál (struskovák)
- zářezy

Vtoková jamka

Zachycuje náraz tekutého kovu z lící pánve a zklidňuje tento tekutý kov před jeho vstupem do dalších částí vtokové soustavy. Velikost jamky se má zvětšovat s rostoucí rychlostí lití. Také tvar vtokové jamky je velice důležitým faktorem z hlediska vyplouvání nečistot a strusky k hladině a zadržení těchto nečistot po celý průběh lití.

Licí kůl

Slouží k přivedení tekutého kovu z vtokové jamky do úrovně struskového kanálu. Mívá většinou kruhový průřez, který se kuželovitě zmenšuje směrem k vtokové jamce. Velmi důležitý je horní průřez. Aby ve vtokové soustavě nevznikl podtlak, musí být průřez v určitém vztahu k nejužšímu průřezu vtokové soustavy. [3]

Struskový kanál

Rozvádí tekutý kov k zářezům a zachycuje strusku s případnými nečistotami, které by tekutý kov mohl cestou strhnout do odlitku.

Pro správnou funkci musí být při lití zaplněn kovem a jeho průřez musí být větší než součet ploch zářezů. [2]

Zářezy

Spojují struskový kanál s dutinou formy. Umístění zářezů nesmí být na koncích struskového kanálu. Tekutý kov musí narazit na stěnu struskového kanálu, tím se vytvoří podmínky pro vyplavení strusky. [2]

1.2.3 Základní výpočty vtokových soustav

K výpočtu vtokové soustavy je zapotřebí vypočítat dobu lití, střední výšku lití, celkovou plochu zářezů a určit zdali bude vtoková soustava přetlaková, nebo podtlaková.

Pro odlévání litinových odlitků se většinou používají přetlakové, čili zaplněné vtokové soustavy. To znamená, že celkově vypočtená plocha všech zářezů je vždy menší než vypočtený průměr vtokového kůlu. [4]

1.2.4 Výpočet doby lití

Doba lití je důležitý faktor z hlediska možnosti vzniku vad. K výpočtu doby lití τ použijeme vzorec (2) dle Dieterta. [4]

$$\tau = s \cdot \sqrt{G_h} \quad (s) \quad (2)$$

kde:

G_h - hrubá hmotnost odlitku (kg)

s - součinitel závisící na tloušťce stěny odlitku (viz tab. 1).

Tabulka 1 Hodnoty součinitele – s [18]

Sřední tloušťka stěny odlitku (mm)	Běžné odlitky	Velké odlitky
2,5 - 4	1,10	-
4 - 8	1,25	-
8 - 16	1,50	-
16 - 30	1,60	-
30 - 50	1,75	0,50
50 - 80	-	0,65
80 - 120	-	0,80
120 - 230	-	1,20
230 - 300	-	1,70

1.2.5 Výpočet střední lící výšky (tlakové výšky)

Střední výška lití patří mezi další neznámé, které je nutno vypočítat. Závisí na poloze zářezů vůči horní části odlitku. Během lití se mění metalostatický tlak i vlivem stoupání hladiny ve formě, tím pádem se také mění výtoková rychlost kovu v zářezích.

Střední lící výšku stanovíme ze vzorce (3) dle Dieterta. [2]

$$H_{stř.} = \frac{2 \cdot hc \cdot C - P^2}{2 \cdot C} \quad (cm) \quad (3)$$

kde:

$H_{stř.}$ - střední výška lití (cm)

hc - je rozměr definovaný vzdáleností mezi středem výšky vtokové jamky a středem výšky zářezu (cm)

P - výška odlitku nad zářezem (*cm*)

C - výška odlitku ve formě (*cm*)

1.2.6 Výpočet řídicího průřezu vtokové soustavy

Řídicím průřezem vtokové soustavy je nejužší průřez v celé soustavě – zářez.

Celkovou plochu zářezů vypočteme ze vzorce (4) dle Ossana. [4]

$$S_z = \frac{G \cdot 1000}{\tau \cdot \mu \cdot \rho_t \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{stř.}}} \quad (cm^2) \quad (4)$$

kde:

S_z - celková plocha zářezů (cm^2)

G - hmotnost odlitku (kg)

ρ_t - měrná hmotnost tekutého kovu (kg/m^3)

τ - doba lití (s)

μ - součinitel celkového odporu vtokové soustavy - 0,35 (-)

$H_{stř.}$ - střední výška lití (cm)

g - gravitační zrychlení ($9,81 \, m/s^{-2}$)

1.2.7 Výpočet struskového kanálu

Struskový kanál se vypočítá po určení rychlostních poměrů ve vtokové soustavě. Jelikož se jedná o odlitek z litiny s lupínkovým grafitem, bude struskový kanál spočítán na přetlak dle rovnice 5.

$$S_s = 1,1 \cdot S_z \quad (cm^2) \quad (5)$$

1.2.8 Výpočet průměru vtokového kůlu

Průměr vtokového kůlu vypočítáme z rovnice 6.

$$d_k = \sqrt{\frac{4 \cdot S_k}{\pi}} \quad (mm) \quad (6)$$

1.3 Popis nejčtetnějších vad tenkostěnných odlitků ve slévárně Viadrus a.s. za určité sledované období

Vady odlitků jsou většinou výsledkem několika aspektů a jejich společného působení. Výčet těchto příčin může být velice rozsáhlý, ale mezi významné faktory majícími vliv na výskyt vad odlitků z litiny s lupínkovým grafitem jsou: materiál a prodyšnost formy, odvzdušnění jader a odlitku, teplota kovu, chemické složení kovu, rychlost proudění, plnění formy aj. Atmosféra formy a oxidy ve formovací směsi mohou způsobit také i reoxidaci proudu taveniny. [6]

V této pasáži budou podrobněji rozebrány vady, které jsou vytříděny z interního rozboru vad slévárny, pracovníky kontroly kvality ve firmě Viadrus a.s. Tento soupis poukazuje na 7 nejčtetnějších vad odlitků, za období od 8/2014 do 2/2015. Výběr vad je následující: nezaběhnutí, zavaleniny, bubliny, zahlcený plyn, odvařeniny od formy - jádra, povrchové připečeniny a zadrobeniny .

1.3.1 Nezaběhnutí

Vada nezaběhnutí se zpravidla vyznačuje nedokonalým vytvořením tvaru odlitku v jeho tenké, nebo horní části, protože předčasně ztuhlo čelo proudu kovu. Odlitek tak nemá tvar, rozměr a přesnost podle výkresové dokumentace. Jednou z hlavních příčin nezaběhnutí je nízká teplota lití. Nutno respektovat pravidlo, čím tvarově složitější je odlitek, tím by měla být vyšší teplota lití. Vysoká teplota lití je však omezena vyšším vývinem plynů v tavenině, které mohou při jejich uvolňování v době lití naopak svým protitlakem bránit vyplnění formy. Vada vzniká i u forem s malou prodyšností, nebo při nedokonalém odvětrání formy výfuky. [5]

1.3.2 Zavaleniny

Zavaleniny se projevují jako prohlubně, rýhy nebo zvrásnění se zaoblenými okraji. Objevují se na povrchu odlitku v blízkosti zalévaných předmětů, a také mohou procházet i přes celou stěnu odlitku. [5]

Možné příčiny vzniku:

- Odlitek s velkou povrchovostí a intenzivním ochlazením taveniny (tenké stěny)
- Nízká teplota lití
- Příliš vysoký výskyt plynů ve formě a její špatné odvzdušnění, nebo prodyšnost formy

- Nevhodně řešená vtoková soustava
- Malá rychlost lití vzhledem ke konstrukci odlitku

1.3.3 Bubliny

Pod pojmem bubliny si můžeme obecně představit otevřené, nebo zcela uzavřené dutiny v odlitku. Podle vzniku můžeme bubliny rozdělit do dvou skupin.

- Endogenní bubliny- vznikají z plynů, které jsou rozpuštěny ve slitině. Pokud tlak těchto plynů převýší odpory, které proti nim působí, vznikne otevřená, nebo uzavřená dutina v odlitku.[5]
- Exogenní bubliny- vznikají při samotném lití. Tyto bubliny vznikají, když tlak plynů v okolí odlitku převýší odpor, který mu klade tuhnoucí povrchová vrstva a vnikne do odlitku. Exogenní bubliny mohou být někdy zaměňovány s vadou zahlcený plyn, protože jejich vznik je velice podobný. [5]

1.3.4 Zahlcený plyn

Tato vada vzniká při plnění formy tekutým kovem, pokud rychlost plnění formy převýší rychlost odvodu plynů. Zbylé plyny mohou zůstat zachyceny ve špatně odvětrávaných místech formy. Na množství plynu zachyceného ve formě má vliv především rychlost plnění formy, lící rychlost odlévaného kovu a v neposlední řadě také i prodyšnost formy. Při menší lící rychlosti zbývá více času k úniku plynu. [5]

1.3.5 Odvařeniny od formy - jádra

Odvařeniny se často vyskytují v různých koutech odlitku, kde je písek oblit kovem v méně upěchovaných místech formy. Různý charakter a tvar může mít odvařenina od jádra. Podle velikosti jádra, druhu formovací směsi, intenzity vývoje plynů atd. může dojít k úplnému vyvaření formy, ale také k vytvoření bubliny v některém místě odlitku. Silné odvaření od jádra je často doprovázeno vyhazováním kovu z formy, ale nemusí být ani patrné.

Velice nebezpečné místa na odlitku jsou různé kouty tvořené vystupujícími hranami písku, protože se snadno prohřívají a je zde zpomalena krystalizace (obr. 9). Nejnebezpečnější jsou syrové formy, kdy při styku taveniny s formou dochází k okamžitému vývinu vodní páry. [5]



Obr. 9 Odvařenina od formy, jádra

1.3.6 Povrchové připečeniny

Tato vada je způsobena chemickou reakcí při styku forma – kov. Kov penetruje do větší hloubky než je průměr zrna. Vyznačuje se poměrně tenkou vrstvou písku pevně spojenou s povrchem odlitku. Vysoká adheze připečenin k povrchu je způsobena tvorbou vícesložkových skel. K odstranění připečenin je možno použít broušení, nebo opětovné otrýskání odlitků. [5]

1.3.7 Zadrobeniny

Zadrobeniny jsou vnitřní dutiny ve stěnách odlitku vyplněné formovacím materiálem. Výskyt zadrobenin je možné pozorovat u odlitků s ostrými hranami a výstupky odlévaných do pískových forem. Vznik této vady může způsobit řada činitelů, například: konstrukce odlitku, vtoková soustava, modelové zařízení, nedostatečně vytvrzená jádra a v neposlední řadě i strojní zařízení. [5]

1.4 Využití výpočetní techniky k simulacím lití a tuhnutí

Úkolem numerických simulačních programů je co nejpřesněji matematicky namodelovat procesy, které probíhají v soustavě odlitek – forma a okolní prostředí. V posledních letech numerické simulační programy značně ovlivnily rozvoj slévárenských a metalurgických procesů. Můžeme tedy konstatovat, že využití simulačních programů má velice pozitivní vliv na celkovou jakost odlitků a tím pádem také na rozvoj celého slévárenského oboru. [23]

Jednou z hlavních oblastí je predikce vad v odlitcích a jejich výsledných mechanických vlastností. Tyto programy nám blíže objasňují a specifikují chování tekutého kovu ve slévárenské formě. Pomocí simulačních programů (softwaru) jsme schopni zjistit, jak se bude tekutý kov chovat při plnění formy, tuhnutí a chladnutí odlitku, zjišťovat mechanické vlastnosti, výslednou mikrostrukturu a v neposlední řadě také zbytková pnutí v odlitku. Německá firma ©MAGMA Giessereitechnologie GmbH má již zařazen také ve svém portfoliu nádstavbový modul zvaný „vstřelování pískových jader“ (Core+Mold) pro technologie Cold – Box a Hot – Box. U numerické simulace je hlavní prioritou, přiblížit se skutečné realitě při výrobě odlitků daného provozu.

Numerické simulační programy používají ke svým výpočtům mimo jiné, řadu matematických rovnic, fyzikálních zákonů, diagramů aj. Ve své databázi mají také zakotvené termofyzikální veličiny různých druhů odlévaných materiálů, formovacích směsí, exotermických obkladů nálitků, licích filtrů aj.

1.4.1 Matematické metody řešení numerických simulací

K popisu fyzikálních jevů se využívají soustavy obyčejných, nebo diferenciálních rovnic, které jsou platné jen pro určitou oblast. Aplikují se na ně jen vhodné počáteční a okrajové podmínky. Nalézt řešení těchto soustav o mnoha neznámých je pro matematické metody dosti obtížné. Počítače si s tímto problémem dovedou poradit, ale musíme tyto soustavy převést do algebraické formy zahrnující jen základní aritmetické operace. [8]

Metody lze rozdělit na analytické a numerické.

1. Analytické metody

Metody mají dosti omezené použití. Jejich použití se aplikuje jen ke kontrolnímu řešení velmi jednoduchých úloh. Analytické metody používají integrální transformace a jejich řešení bývá ve formě matematického výrazu, nebo jen v jednoduché funkční závislosti. Jejich přesnost je obvykle postačující. [8]

2. Numerické metody

Podstatou numerických metod je diskretizace proměnných. Tyto metody se především uplatňují v počítačovém modelování, poněvadž je pro ně typická práce na principu opakovatelnosti jednoduchých algebraických operací určitého typu. Numerické metody nám umožňují získat řešení v konečném počtu míst (uzlů) zvolené diferenční sítě, nebo sítě

konečných prvků. Výsledek tohoto řešení může být pro celou oblast, nebo jen v její povrchové části. [8]

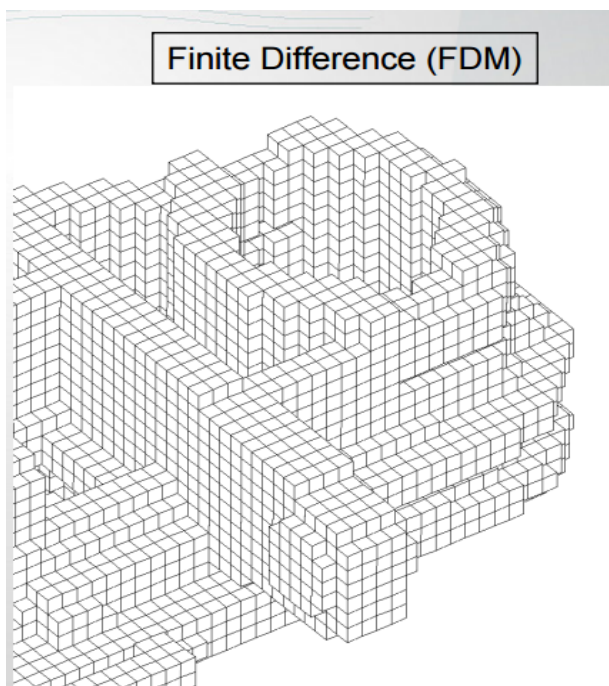
1.4.2 Rozdělení numerických metod

1. Metoda konečných diferencí (FDM)

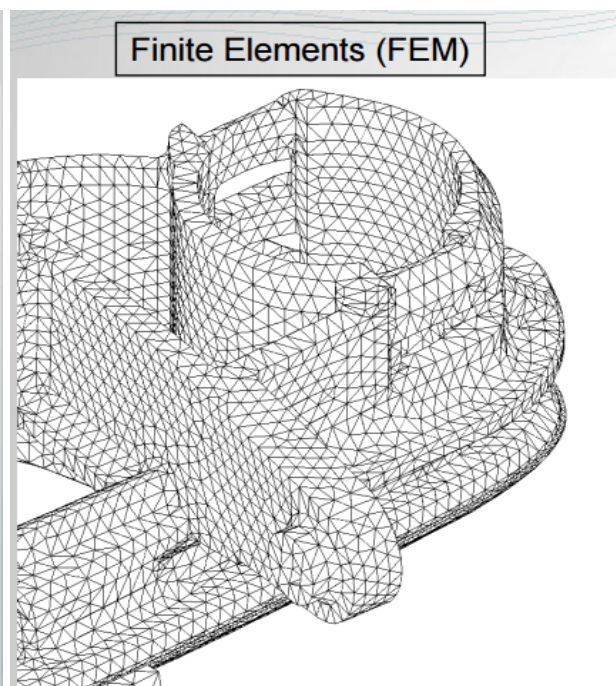
Tato metoda je nazývána jako metoda sítí a je jednou z nejpoužívanějších metod numerického řešení parciálních rovnic. Podstata spočívá v aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající rovnici diferenční, která má tvar soustavy algebraických rovnic. [8] Čím přesněji jsou nahrazovány derivace, tím je tato metoda přesnější. Na obr. 10 je znázorněna vygenerovaná síť pomocí metody FDM.

2. Metoda konečných prvků (FEM)

Metoda spočívá v rozdělení tělesa na dané oblasti, tzv. konečné prvky. Prvky jsou spolu vázány v uzlových bodech. K určení hledané závislosti je vhodné používat integrální funkcionál. Ten je dle autora literatury [8] představován jako integrál, který je v celé oblasti a části hranice, na které nejsou známy příslušné funkce nebo jejich derivace. Obr. 11 znázorňuje vygenerovanou síť pomocí metody FEM.



Obr. 10 Síť generovaná metodou FDM [14]



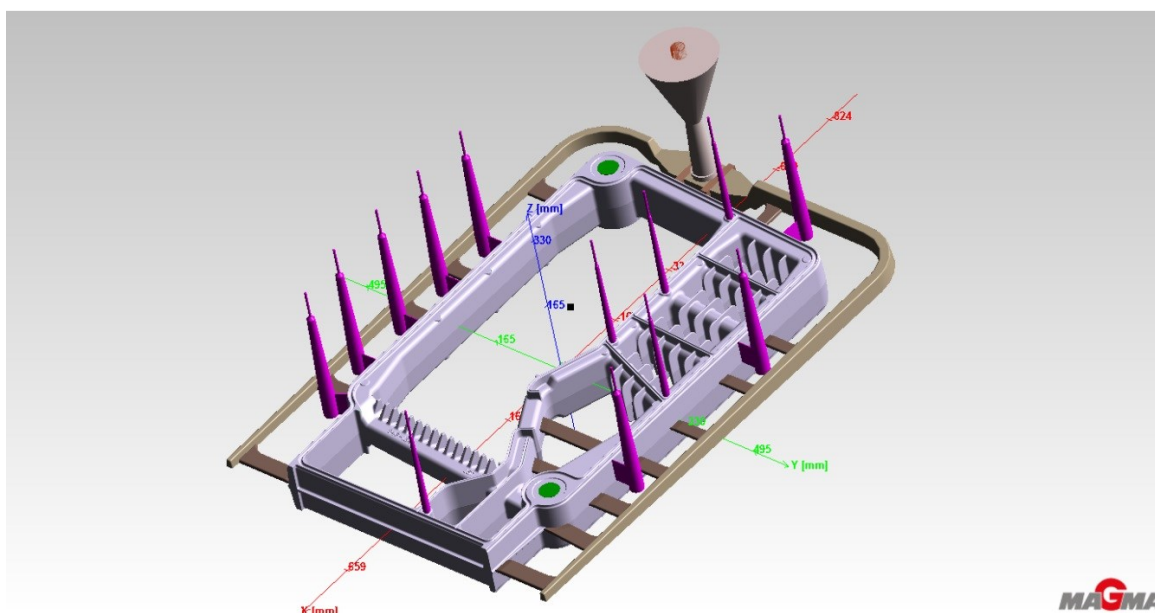
Obr. 11 Síť generovaná metodou FEM [14]

okolo 1161°C, což bylo na hranici liquidu. Samozřejmě zde také docházelo k nesvaření podpěrek, jež se zde používají z důvodu udržení pískového jádra, které by se mohlo vlivem vztlaku tekutého kovu v dutině formy rozlomit. Podrobněji je tento problém vidět na obrázku 13, kde pomocí tzv. trasovacích bodů vidíme simulaci plnění dutiny formy tekutým kovem. Jednotlivé kroky lití jsou znázorněny v časových intervalech. Čím světlejší jsou částice, tím chladnější je tekutý kov.



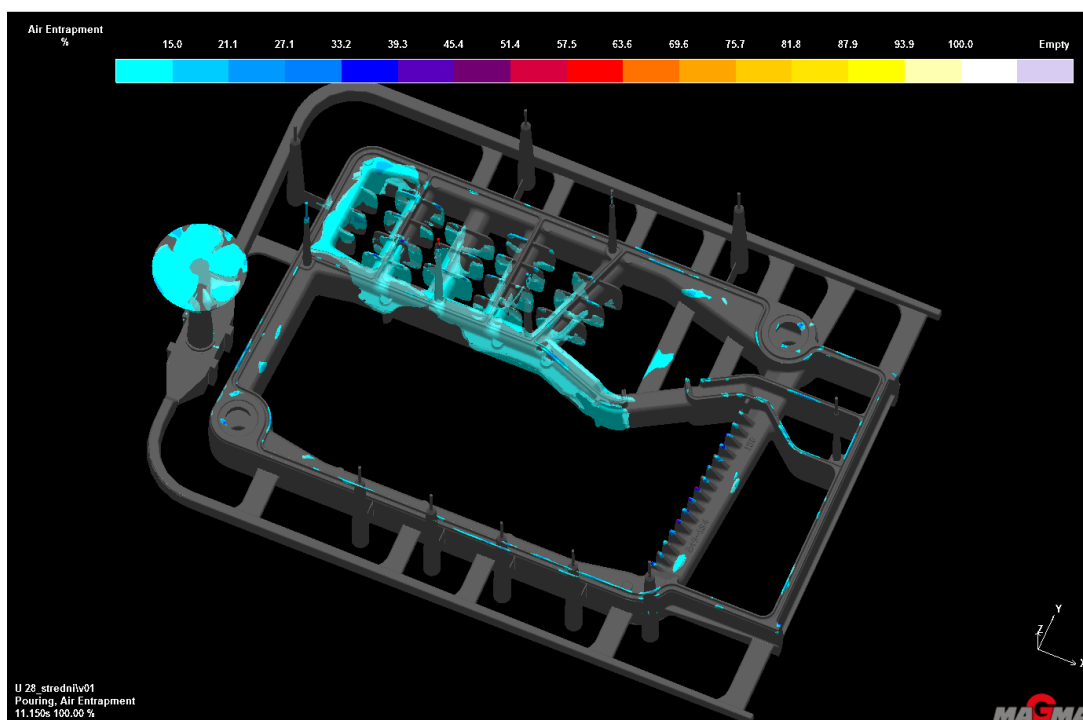
Obr. 13 Znázorněný průběh lití pomocí trasovacích bodů

Další úprava, spočívá v optimalizaci odvzdušnění dutiny formy (obr. 14).



Obr. 14 Kotlový článek s enormním počtem výfuků

Velké množství výfuků vedoucích z dutiny formy zde působil spíše kontraproduktivně. Místo odvedení vzniklých plynů, par a vzdušné atmosféry z dutiny formy, způsobovaly zpětné nasátí okolní atmosféry do prostoru formy (obr. 15).



Obr. 15 Zůstatek plynů v dutině formy po odlití

Obrázek 15 poukazuje na množství plynů, které zůstaly v dutině formy po odlití. Znázorněné množství je nastaveno nad 15% z důvodů přehlednějšího rozeznání. Bledě modrá místa ukazují množství plynů v dutině.

Toto byl důvod rozsáhlých penetrací (přípečenin) na povrchu odlitku. Dle autora [5] se jednalo o teorii penetrace za spoluúčasti chemických reakcí. V průběhu celého lití docházelo k nasávání okolní vzdušné atmosféry do dutiny formy a následné oxidaci kovu. Plenka oxidů železa zvyšuje smáčivost formy. Úhel smáčení je po 3-5 minutách téměř nulový u všech druhů formovacích směsí a kov je v tomto případě již do mezizrnových prostorů formovací směsi nasáván.

Okolo 70% výroby kotlového článku U 28 střední muselo být z důvodů penetrace odstaveno na opravu opětovným tryskáním a přebroušením, což enormně zvyšovalo náklady na výrobu tohoto odlitku. Navíc skoro 20% odlitků neprošlo následnou tlakovou zkouškou z důvodů průsaku vodního media přes stěnu odlitku.

2.1 Výpočet vtokové soustavy

Pro výpočet vtokové soustavy odlitku musíme znát několik základních údajů.

- Hmotnost odlitku – 77 (kg)
- Výška odlitku - 11,3 (cm)
- Výška odlitku nad dělicí rovinou - 5,8 (cm)
- Výška formovacích rámců – 2×30 (cm)

2.1.1 Doba lití

$$\tau = s \cdot \sqrt{G_h} \quad (2)$$

$$\tau = 1,25 \cdot \sqrt{77}$$

$$\tau = 10,96 \text{ s}$$

2.1.2 Výpočet střední tlakové výšky

$$H_{\text{stř.}} = \frac{2 \cdot hc \cdot C - P^2}{2C} \quad (3)$$

$$H_{\text{stř.}} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 11,3 - 5,8^2}{2 \cdot 11,3}$$

$$H_{stř.} = 28,5115 \text{ cm}$$

2.1.3 Výpočet minimálního průřezu vtokové soustavy

$$S_z = \frac{G \cdot 1000}{\tau \cdot \mu \cdot \rho_t \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{stř.}}} \quad (4)$$

$$S_z = \frac{77000}{10,96 \cdot 0,35 \cdot 6,9 \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 28,5115}}$$

$$S_z = 12,30 \text{ cm}^2$$

2.1.4 Určení druhu vtokové soustavy dle rychlosti lití

Jelikož se jedná o tenkostěnný odlitek s průměrnou tloušťkou stěny 5 mm, odlitého z litiny s lupínkovým grafitem, budou následující výpočty struskového kanálu a licího kůlu propočítány pro přetlakovou vtokovou soustavu v poměru:

$$S_z : S_s : S_k = 1 : 1,1 : 1,1$$

2.1.5 Výpočet struskového kanálu

$$S_s = 1,1 \cdot S_z \quad (5)$$

$$S_s = 1,1 \cdot 12,30$$

$$S_s = 13,53 \text{ cm}^2$$

2.1.6 Výpočet průměru vtokového kůlu

$$d_k = \sqrt{\frac{4 \cdot S_k}{\pi}} \quad (6)$$

$$d_k = \sqrt{\frac{4 \cdot 1353}{3,14}}$$

$$d_k = 41 \text{ mm}$$

2.2 Porovnání vypočítaných a stávajících parametrů vtokové soustavy

Kontrola parametrů původní vtokové soustavy byla provedena měřením pomocí posuvného měřítka po demontáži z modelové desky. Doba lití byla změřena v průběhu samotného liciho cyklu. Výsledky měření jsou sepsány v tabulce 2.

Tabulka 2 – Porovnání výpočtu se skutečností

	Vypočtené výsledky	Naměřené výsledky
Minimální průřez vtokové soustavy (zářezy)	$\Sigma 12,30 \text{ cm}^2$	$\Sigma 12,35 \text{ cm}^2$
Struskový kanál	$\Sigma 13,53 \text{ cm}^2$	$\Sigma 14,02 \text{ cm}^2$
Vtokový kůl	Ø 41 mm	Ø 45 mm
Doba lití	10,96 s	10,5 – 11,5 s

Výsledky ukázaly nepatrné odchylky v zářezech a struskovém kanále vtokové soustavy. Větší rozdíl byl v průměru liciho kůlu.

Výpočtem byl průměr kůlu spočítán na Ø 41 mm a v původní vtokové soustavě byl kůl o Ø 45 mm. Původní vtoková soustava měla předimenzovaný kůl, to znamená, že byla propočítána na vyšší přetlakový poměr.

3 VERIFIKACE NÁVRHU TECHNOLOGIE S VYUŽITÍM SIMULACE

Nový návrh spočívá v optimalizaci vtokové soustavy odlitku za pomoci simulačního programu MAGMA 5.2 s výpočtovým modulem Magma Iron vyvinutého německou firmou ©MAGMA Giessereitechnologie GmbH. Firma Viadrus a.s. tento numerický simulační program zakoupila v lednu 2014.

3.1 Nastavení základních parametrů simulace

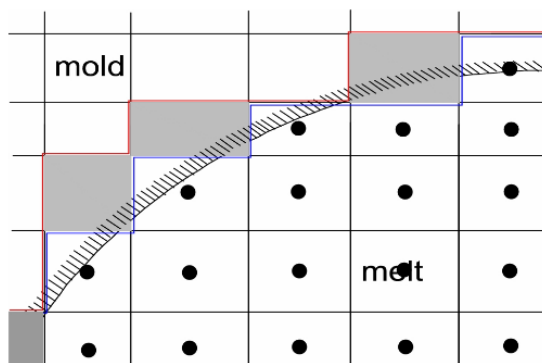
Pro samotný výpočet je zapotřebí nastavit 5 určených kroků, které je nutno zadat. Jedná se o body 3.1.1 až 3.1.5. Čím přesněji budou tyto kroky nastaveny, tím přesnější bude výpočet.

3.1.1 Tvorba geometrie

Simulační program ke své práci potřebuje zkreslenou geometrii součásti, vytvořenou v CAD systému. Geometrie je vytvořená v různých datových formátech. Datový grafický formát je soubor, který obsahuje informace o způsobu uložení grafických údajů, jejich zobrazení a způsobu komprimace. Existuje velice mnoho datových formátů, musíme nejdříve zjistit podporovaný formát simulačního software. Exportována geometrie všech součástí byla exportována v datovém formátu „sat“.

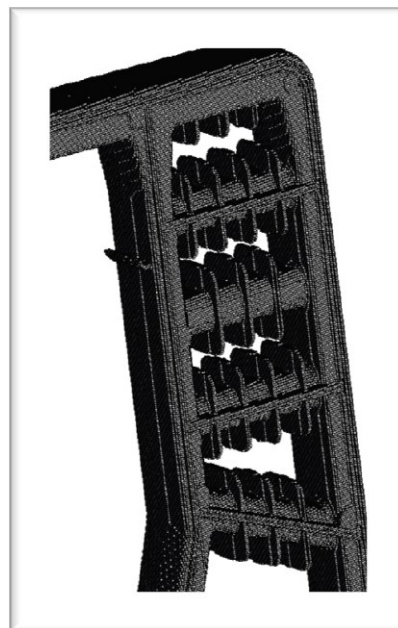
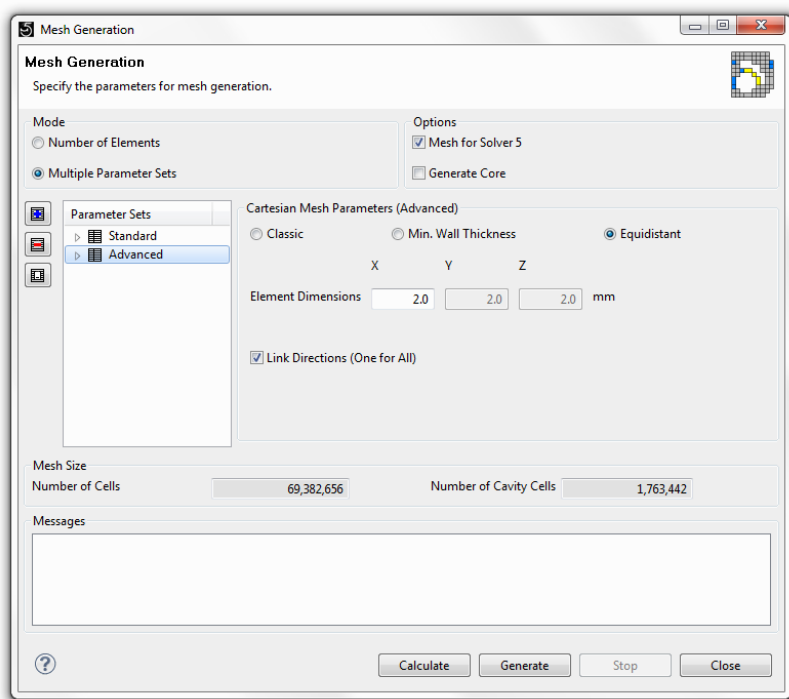
3.1.2 Tvorba sítě

Solver 5 – je algoritmus pro velmi přesný výpočet který, dopočítá rozdíl mezi nasítovanou geometrií a vlastním 3D tvarem (eliminuje kostičkový tvar odlitku - metoda FDM). Vytvoří přesný algoritmus pro povrchovou turbulenci, teplotně závislou viskozitu a model pro tření (obr. 16). Při generování sítě metodou FDM je nutno počítat s kapacitou vlastního hardwarového zařízení. Maximální počet vygenerované equidistantní sítě s algoritmem Solver 5 je 5 milionů kovových elementů. Samozřejmostí je také, čím jemněji vygenerujeme síť, tím delší je čas výpočtu.



Obr. 16 Princip algoritmu Solver 5

Pro samotný výpočet byla vygenerována jemná equidistantní síť s počtem 1,763 mil. kovových elementů (obr. 17).



Obr. 17 Vygenerovaná síť

3.1.3 Nastavení počátečních a okrajových podmínek

V této skupině si volíme technologii odlévání, materiál odlitku, materiál jádra, licí teplotu, teplotu formy, jádra a okolí, podmínky přestupu tepla aj. (Tab. 3). Simulační program má ve své databázi již zakomponované termofyzikální data k různým druhům materiálu.

Tabulka 3 Vstupní data potřebné k výpočtu simulace

Materiál odlitku	EN GJL 150
Teplota tekutého kovu	1395°C
Doba lití	11s
Vlhkost JBS	3,4%
Prodyšnost JBS	150
Teplota formovací směsi	45°C
Teplota jádra	20°C
Velikost formovacích rámců	1850 x 1400 x 300/300
Materiál jádra	Křemičitý písek
Metoda výroby jádra	Cold - Box

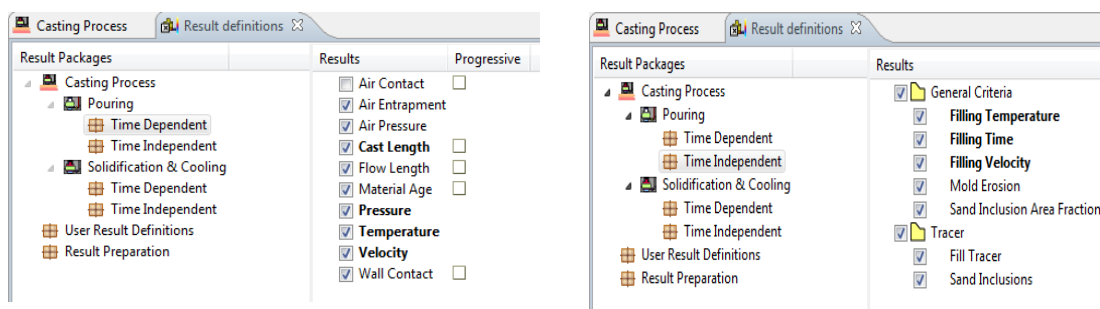
Pro výpočet lze i zadat experimentálně naměřená, nebo upravená data dané slévárny, např. chemické složení (Tab. 4).

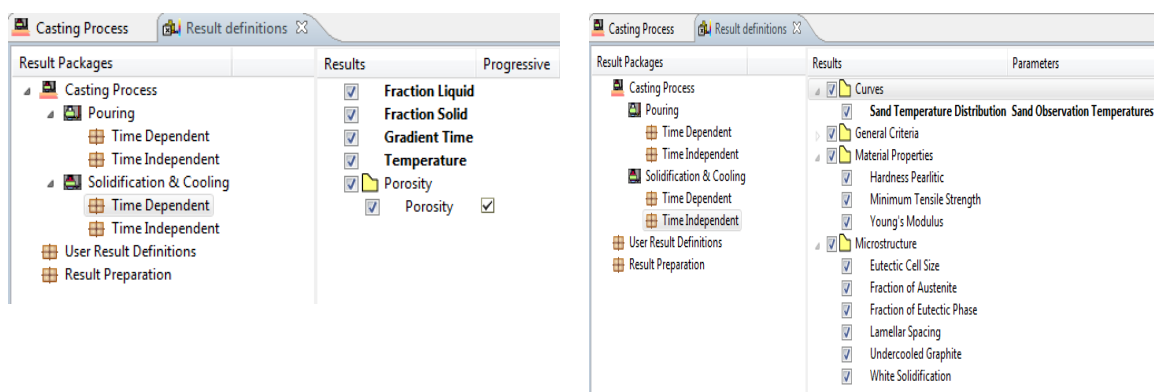
Tabulka 4 Upravené chemické složení litiny s lupínkovým grafitem EN-GJL-150

Uhlík - C	3,53%
Křemík - Si	2,08%
Mangan - Mn	0,55%
Fosfor - P	0,3%
Síra - S	0,09%
Chrom – Cr	0,15%

3.1.4 Nastavení výpočtu

U nastavení výpočtu si můžeme zvolit, co bude simulační program počítat. Jestli jen plnění tekutým kovem (obr. 18 a), nebo také tuhnutí a chladnutí odlitku (obr. 18b).

**Obr. 18 a** Nastavení požadovaných kritérií k výpočtu - plnění



Obr. 18 b Nastavení požadovaných kritérií k výpočtu - tuhnutí a chladnutí odlitku

3.1.5 Spuštění simulace

Délka simulace závisí na složitosti a velikosti zadané součásti, výkonem počítače, metodě výpočtu a v neposlední řadě na počtu kovových elementů vygenerované equidistantní sítě.

3.1.6 Kontrola vypočtených výsledků

Výsledky simulace si můžeme zobrazit na monitoru ve formě obrázků, nebo animace.

U plnění odlitku lze sledovat plnění formy tekutým kovem, teplotní pole odlitku i formy, čas tuhnutí, postup tekuté fáze, odvod plynů z formy, rychlost taveniny, tlak taveniny aj.

Chladnutí a tuhnutí nám zobrazuje přítomnost tekuté fáze, vznik staženin, mikrostrukturu, křivky chladnutí a mnoho dalších užitečných věcí.

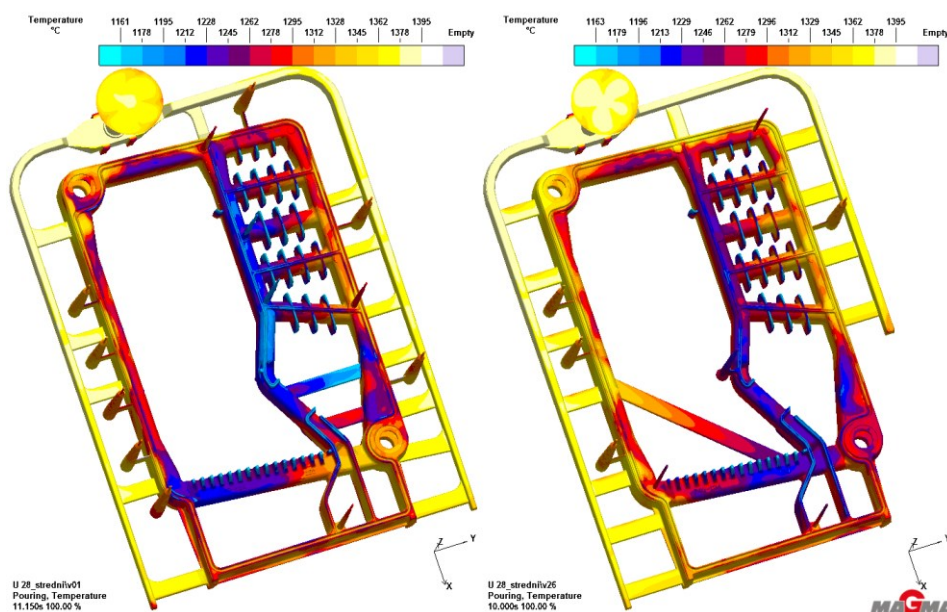
Z dosažených výsledků můžeme posoudit, zdali je kvalita odlitku vyhovující, nebo je potřeba přistoupit k technologickým či konstrukčním úpravám.

3.2 Úprava vtokové soustavy a odvzdušnění formy

Nový tvar vtokové soustavy spočívá v rovnoměrnějším plnění formy taveninou při lití kotlového článku. Optimalizovaná vtoková soustava toto místo již při plnění tekutým kovem zprůtočnila a teplota po odlití kovu do formy byla okolo 1235°C. Místo okolo roštu se posílilo pomocí propojky, která dovedla tekutý kov z místa zářezu k nezaběhlým segmentům roštu odlitku. Na obrázku 19 je znázorněna teplota v odlitku s vtokovou soustavou před a po optimalizaci.

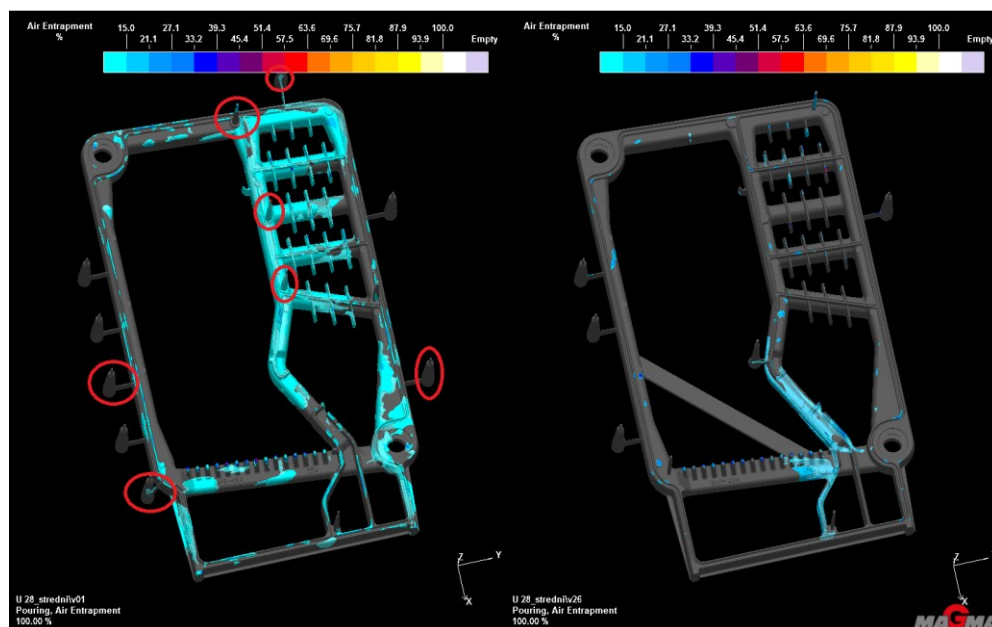
Vtoková soustava před úpravou

Vtoková soustava po úpravě



Obr. 19 Teplota v odlitku před a po optimalizaci

Mezi další úpravy, které se s pomocí numerické simulace prováděly, byla optimalizace odvzdušnění dutiny formy (obr. 20). Z importované geometrie se odstranily všechny výfuky a zadal nový propočet. Po vyhodnocení výpočtu se pozvolna do geometrie přidávalo nové odvzdušnění formy (výfuky). Další simulace ukázala dostatečný počet výfuků, které budou postačující při lití kotlového článku. Počet výfuků byl optimalizován z 12 kusů na 8 ks.



Obr. 20 Odvzdušnění kotlového článku před a po optimalizaci

4 VÝROBNÍ AGREGÁTY POUŽITÉ K VÝROBĚ ODLITKU

Tato kapitola okrajově nastíní výrobní zařízení při výrobě kotlového článku U 28 střední z hlediska výroby tekutého kovu, jádra, formovací směsi, formování a samotného lití kotlového článku.

4.1 Výroba tekutého kovu

Výroba litiny s lupínkovým grafitem probíhá v kupolových pecích. Kuplovny jsou šachtové pece, pracující principem protiproudého výměníku tepla. Zdrojem tepla v kuplovnách je nejčastěji koks. Kuplovna je tvořena ocelovým pláštěm a po celé výšce, nebo částečně vyzdělána žáruvzdornou vyzdívkou. Součástí kupolových pecí je indukční předpecí, sloužící k uchování nataveného tekutého kovu s patřičnou teplotou přehřátí (obr. 21).



Obr. 21 Kupolová pec s indukčním předpecím

4.2 Výroba jader metodou Cold - Box

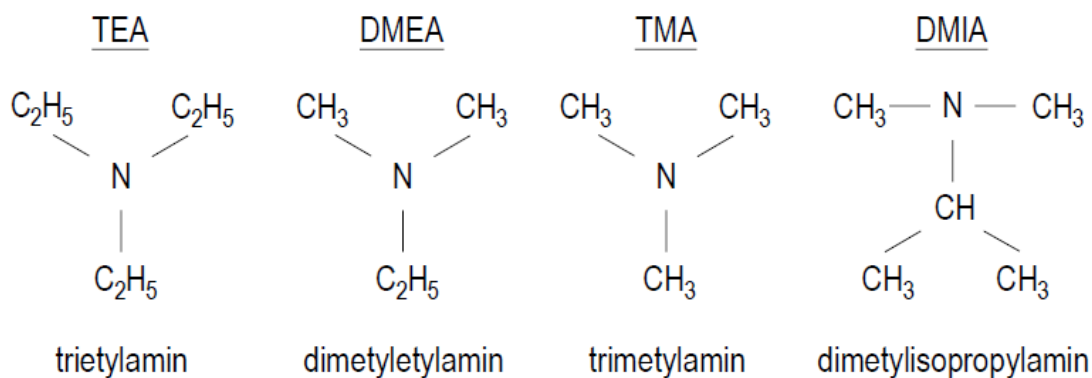
Ve firmě Viadrus a.s. se pro výrobu jader kotlových článků využívá metoda studeného jaderníku zvaná Cold-Box. Stroje pro výrobu jader jsou znázorněny na obrázku 22.



Obr. 22 Stroje pro výrobu jader metodou Cold-Box

Tato metoda byla objevena a také následně patentována v USA. Princip spočívá v použití kombinovaného pojiva, při kterém se smísí dvě kapalné složky, které se promíchají s ostřivem a po následném vstřelení do jaderníku jsou vytvrzeny plynným katalyzátorem. První kapalnou složkou jsou vytvrditelné pryskyřice, které mohou být alkydové, epoxidové, polyesterové, fenolformaldehydové, nebo fenolické. Druhou složku tvoří tvrdidlo difenylmetandiizokyanát. [5]

Jelikož mezi těmito složkami probíhá pomalá reakce, proto se k urychlení reakce používá katalyzátor. Nejpoužívanější druhy katalyzátorů jsou znázorněny na obrázku 23. Velkou pozornost musíme věnovat teplotě ostřiva, ta velice ovlivňuje reaktivnost směsi. [21]



Obr. 23 Druhy katalyzátorů [5]

Teplota tekutého kovu oslabí pojivové mosty mezi zrnem ostřiva a pojivem natolik, že se písek dá vyklepat z odlitku mechanickou cestou. [19]

Metoda výroby jader vstřelováním COLD-BOX, patří mezi vysoce produktivní výrobu.

4.3 Formovací směs

K výrobě forem se používá jednotná bentonitová směs (JBS). Na slévárně kotlů je hlavním mísičem pro přípravu formovací směsi turbínový mísič Rotomax 2500 (2500 kg). Kolový mísič MKY 710 je používán v případě nutnosti doplnění formovací směsi pro linku HWS SINTO a strojní formovnu.

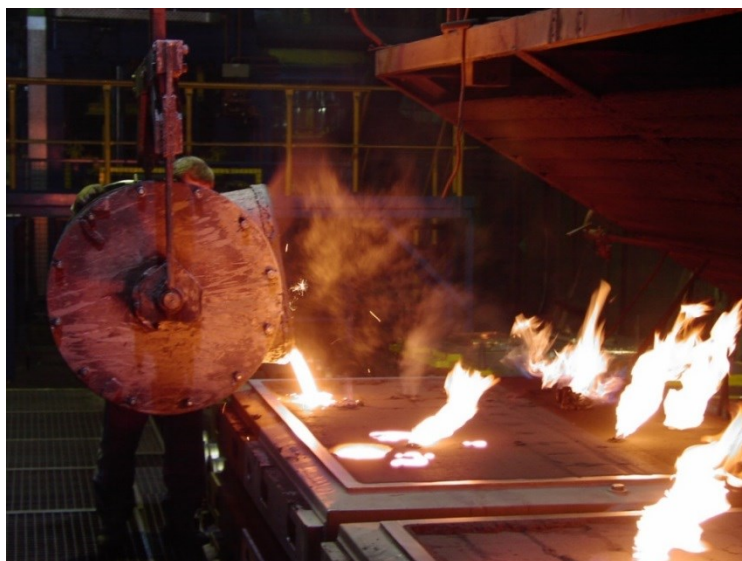
4.4 Formovna

Formování je prováděno na automatické formovací lince HWS (Heinrich Wágner Sinto). Formovací linka HWS SINTO je určena pro sériovou výrobu odlitků, které mohou být umístěny do formovacího rámu velikosti 1850 x 1400 x 300/300 mm. Maximální výkon linky je 23 ks kompletních forem za hodinu.

4.5 Odlévání tekutého kovu

Na pracoviště úpravy tekutého kovu je dovážen kov z tavírny Prodlew slévárny radiátorů. Kov je dovážen vysokozdvížnými vozíky v transportních bubnových pánvích o obsahu 1500 kg, které jsou umístěné na podstavci.

Odlévání tekutého kovu je manuální. Tekutý kov se vlévá do bubnové pánve, která je zavěšená na mostovém jeřábu z indukčního předpecí a převáží se na pracoviště „licí pole“. Maximální kapacita licí pánve je 1000 kg tekutého kovu. Proces samotného lití je zobrazen na obrázku 24.



Obr. 24 Gravitační lití odlitků

5 ODLITÍ ZKUŠEBNÍHO ODLITKU

Zkušební odlitky byly odlity koncem měsíce února 2014. Nejprve byla provedena zkouška na 10 ks odlitků. Zkouška dopadla výtečně, bez jediného zmetkového kusu odlitku. Následovala další zkouška již na 50 kusech. Opět s pozitivním výsledkem. Proto bylo navrženo dát výrobu odlitku U 28 střední do sériové výroby.

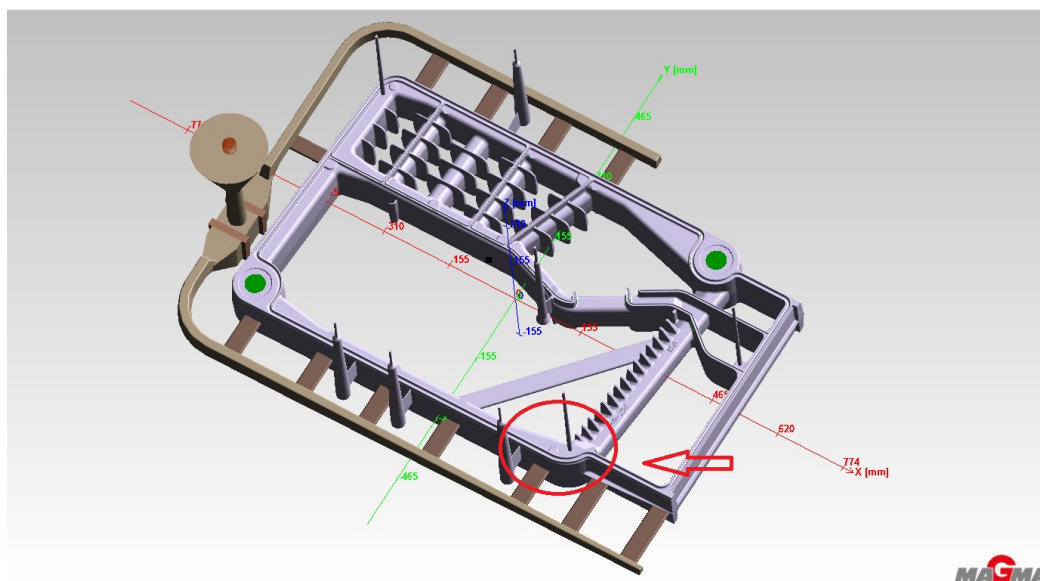
Tabulka 5 ukazuje výslednou neshodnou výrobu před a po optimalizaci vtokové soustavy a odvzdušnění kotlového článku. Hodnoty byly převzaty z tabulek vnitropodnikové vnitřní neshody výrobků. Jak je patrné z tabulky 5 při nově navržené technologii optimalizace došlo ke snížení neshodné výroby kotlového článku z 36,2% na 4,2%.

Tabulka 5 - Vyjádření neshodné výroby před a po úpravě vtokové soustavy

Hrubá výroba (ks)	Počet zmetků (ks)	Vyjádřeno v %	
1204	436	36,2%	Před úpravou
549	23	4,2%	Po úpravě

Tato technologie fungovala ve výrobě od 2/2014 do 10/2014.

Začátkem 11/2014 se objevila nová vada v tomto kotlovém článku. Jednalo se o vystupující dutinu na povrch kotlového článku, která byla jen v určité partii kotlového článku vyznačena na obrázku 25.



Obr. 25 Kotlový článek s vyznačeným místem výskytu vady

Vada se zprvu objevovala jen v počtu několika kusů z jedné výroby. Toto však sílilo, až se hodnota neshodné výroby dostala při výrobě tohoto typu kotlového článku k 50%.

Na obrázku 26 je vyfocena vada kotlového článku při třídění neshodné výroby odborem kontroly kvality.



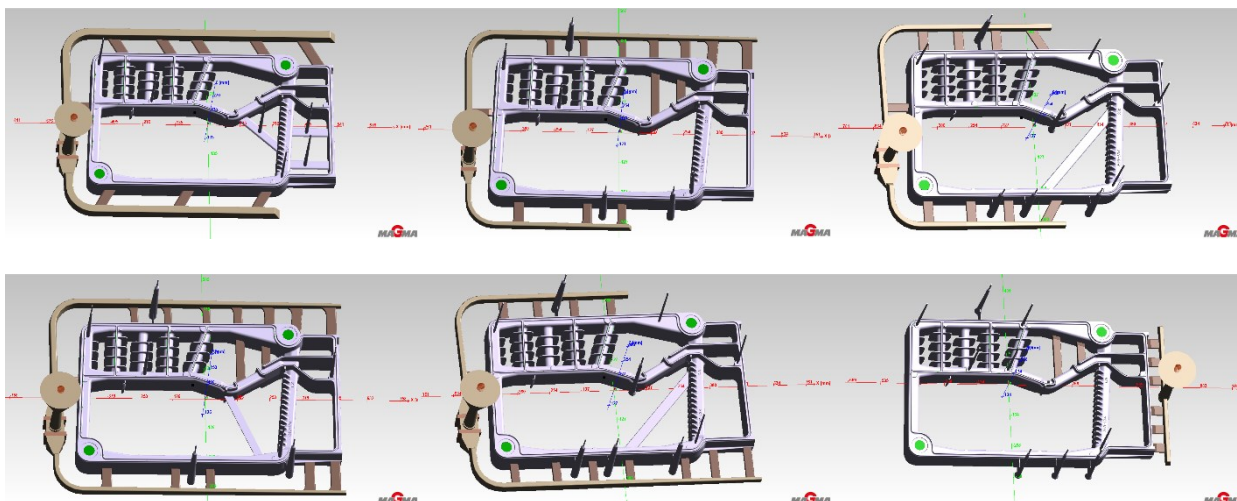
Obr. 26 Výskyt nové vady v kotlovém článku

5.1 Kontrola odvzdušnění formy a obměna vtokových soustav

Prvotní domněnky byly, že jde o nedostatečně odvzdušněnou formu při plnění tekutým kovem. Toto však simulační program i po zadání jiných parametrů formovací směsi jako je vlhkost formovací směsi, prodyšnost formy neukázal.

Mezi další pokusy patřilo navržení a spuštění jiných optimalizací s následnou obměnou vtokových soustav, odvzdušnění formy, včetně původního návrhu. Každý návrh byl také následně odzkoušen na zkušebních 10 ks odlitků v samotné výrobě. Výsledek zkoušek byl negativní se zmetkovitostí 70%.

Na obrázku 27 jsou znázorněny nové navržené typy vtokových soustav.



Obr. 27 Nově navržené vtokové soustavy

Vliv vtokových soustav byl eliminován, proto se přistoupilo ke zkouškám lití odlitků s pozměněnými technologickými vlastnostmi formovací směsi.

První zkouška byla provedena s vlhkostí formovací směsi okolo 2,8% a pevností v tlaku okolo 260 kPa. Bohužel se tato vada vyskytovala i nadále.

Druhá provozní zkouška byla provedena jen s namíchanou formovací směsí z turbínového mísiče Rotomax 2500, aby se eliminoval vliv dvou různých namíchaných formovacích směsí. Formovací směs z kolového mísiče MKY 710 mívá větší vlhkost. Tuto zkoušku lze provést jen na odpolední směně, poněvadž samotný turbínový mísič nemá dostatečnou kapacitu pro zásobení celé slévárny kotlů formovací směsí.

Odlito bylo 18 ks odlitků s vlhkostí formovací směsi od 2,6 do 3%. Z každého formovacího rámu byl také odebrán vzorek formovací směsi (dříve než byl zhutněn lisovacím zařízením) k posouzení technologických vlastností formovací směsi v pískové laboratoři.

Jednotlivé dutiny budoucích odlitků byly také označeny vtisknutím razidla s číslem do formy, pro pozdější ověření zkoušky. Také teplota tekutého kovu byla měřena u každého lití pomocí přenosného ponorného pyrometru s termosondou. Prvních 12 ks odlitků bylo odlito jen se sníženou vlhkostí formovací směsi. Na zbylých 6 ks odlitků, krom snížení vlhkosti JBS došlo i ke snížení teploty tekutého kovu o 15°C na teplotu lití 1380°C.

Výsledek zkoušky byl negativní se zmetkovitostí okolo 50%, navíc se vada objevila i na odlitcích se sníženou teplotou, které již vykazovaly vadu nezaběhnutí v místě roštu odlitků.

5.2 Kontrola technologických vlastností formovací směsi

Slévárna Viadrus disponuje vlastní pískovou laboratoří, ve které se měří jednotlivé vlastnosti formovacích a jádrových směsí. Tyto výsledky se následně ukládají a archivují v podnikové počítačové síti. Z archivních rozborů jednotlivých vlastností formovací směsi byl zjištěn velký pokles v prodyšnosti. V tabulce 6 jsou průměrné hodnoty od 6/2014 – 2/2015, na kterých je vidět klesající tendence v prodyšnosti formovací směsi.

Tab. 6 Průměrné měsíční hodnoty formovací směsi

období	6/14	7/14	8/14	9/14	10/14	11/14	12/14	1/15	2/15
vlhkost	3,4	3	3	3,2	3,4	3,3	3	3	3,5
prodyšnost	180	160	190	170	140	130	115	120	115
pevnost v tlaku	227	245	231	241	217	235	245	221	261
spěchovatelnost	35	27	31	30	35	28	30	29	25

Po bližším pátrání bylo zjištěno, že se tyto vlastnosti směsi začaly měnit zhruba od začátku 10 měsíce roku 2014.

5.3 Technologické změny ve formovací směsi

Bližší pátrání v historii výsledků formovacích a jádrových směsí poukázalo, že příčinou byla, změna v granulometrii dodávaného ostřiva do jádrových směsí.

Firma, která dodává ostřivo k výrobě jader, již nemohla z důvodů vyčerpání ložiska garantovat velikost průměrného zrna 0,32 mm. Velikost byla v rozmezí od 0,32 – 0,42. Proto bylo bývalým vedením technologie navrženo tzv. míchání dvou frakcí o průměru 0,32 a výše s frakcí 0,25 mm. K tomuto míchání bylo přistoupeno z několika důvodů, které budou následně popsány.

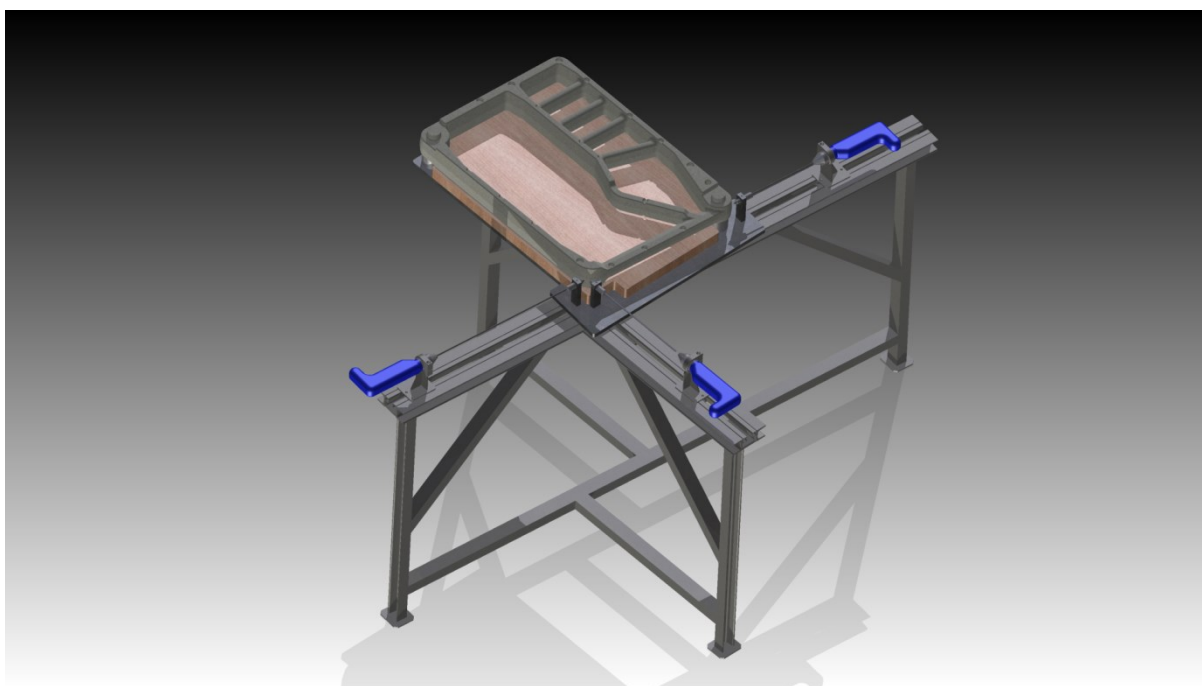
Slévárna Viadrus a.s. má ve svém portfoliu výrobků také litinové radiátory, krbové desky a armaturní odlitky. Tyto odlitky musí z pohledové strany vypadat co nejlépe, pokud možno s co nejmenší drsností povrchu.

K výrobě litinových radiátorů se používají písková jádra, proto tato větší frakce měla za důsledek zvětšení středního zrna ve formovací směsi a také snížení podílu zrn pod 0,125 mm. Obsah podílů zrn pod 0,125 mm nám určuje, jakou budeme mít výslednou kvalitu odlitku z hlediska povrchu. Tato hodnota byla již pod 4%, což je z hlediska dlouhodobého

průměru 6-7% neakceptovatelné. Ve velké míře se začaly objevovat vady typu „přípečeniny“ a také se enormně zvětšila povrchová drsnost u vyráběných odlitků. Slévárně radiátorů tato úprava ostřiva pomohla k nápravě formovací směsi, ale na slévárně kotlů začaly být problémy s prodyšností formovací směsi.

5.4 Navržení odvzdušnění jádra při lití kotlového článku

Z výsledných zkoušek byla potvrzena eliminace vzniku vady od vtokové soustavy. Formovací směs měla technologické vlastnosti, které se nepovedly žádným zásahem upravit, proto se musela najít jiná alternativa k výrobě kotlového článku. Návrh optimalizace spočívá v odvzdušnění problémové partie jádra pomocí jeho navrtání v nově vyrobeném přípravku (obr. 28) a odvedení vznikajících par a plynů z dutiny formy.



Obr. 28 Přípravek pro navrtání průduchového systému v jádře

Po výrobě tohoto přípravku v zámečnické dílně následoval tento postup úpravy jádra. Jádro se upne do přípravku a pomocí 3 elektrických vrtaček, které mají ve svém sklíčidle upnut vrták o průměru 8 mm, se přes roštovou část jádra navrtá. Tyto navrtaná místa se v místě vstupu vrtáků do jádra zaslepí malými jádérky ve tvaru kužele, obrousí a zalepí speciálně namíchanou šamotovou moučkou, která vydrží nejen teplotu odlévaného kovu, ale

také tlak vzniklých plynů. Do problémové části se také pro jistotu zavede speciální odvětrávací hadička, která je k tomuto účelu vyrobena.

Při samotném lití odejdou vznikající plyny z inkriminovaného místa do prostoru známky jádra, kde již mohou volně odcházet do atmosféry.

Provozní zkouška s takto upravenými jádry byla opět nejprve provedena na sérii 10 ks. odlitků. Všechny odlitky byly po vytlučení z formy bez jakýchkoliv vad a po následné tlakové zkoušce vodním médiem bez známek průsaku přes stěnu odlitku.

Tímto postupem již bylo vyrobeno 231 ks odlitků s celkovou neshodnou výrobou okolo 1,73%.

5.5 Nalezení optimálnějších alternativ k výrobě jádra kotlového článku

Navržená technologie popsána v bodě 5.4 se sice jeví jako výborná, ale z hlediska výroby a přípravy jádra k samotnému lití je dosti pracná. Stouply také finanční náklady na výrobu celého kotlového článku, a proto mi bylo vedením podniku navrženo hledat optimálnější řešení.

Nová technologie úpravy jádra potvrdila, že hlavní problém spočívá v jeho zvýšené plynotvornosti. Simulační program ovšem tento vývin plynů neukázal a nepotvrdil.

Důvodem bylo, že numerické simulační programy predikují pouze odvod plynů a par z dutiny formy, ale neumí predikovat vývin plynů ze samotného jádra. Predikci vývinu plynů z jader bohužel neumí žádný simulační program. Hlavním důvodem je chemické složení směsí do pojiv a tvrdidel, které patří mezi výrobní tajemství jednotlivých výrobců, proto se i při navádění výpočtu zadává jen teplota, typ a vlhkost samotného jádra bez chemického složení.

Navíc se vada „odvařenina od formy, jádra“ postupně začala objevovat v počtech několika kusů z jedné výroby i na jiných druzích odlitků kotlových článků vyráběných na slévárně kotlů.

5.5.1 Plynotvornost jader a formovacích směsí

Plynotvornost je schopnost formovacích (jádrových) materiálů uvolňovat při ohřevu plyny a páry. Jsou to nežádoucí děje popisující dílčí chování těchto disperzních materiálů při vysokých teplotách krátce po zalití slévárenské formy, a tudíž by měla hodnota plynotvornosti

vykazovat co nejmenší hodnoty. V průběhu tuhnutí taveniny ve slévárenské formě se začínají prohřívat povrchové vrstvy. V pískové formě, která představuje porézní těleso, se vrstvy formy začnou postupně prohřívat od líce. Pokud tyto vrstvy dosáhnou kritické teploty (např. teplota vypařování vody, teplota rozkladu příslušných složek, atd.), dochází v těchto vrstvách k uvolňování plynů a par. Plynotvornost vyjadřujeme v cm^3/g směsi, případně na cm^3 směsi.

Kromě množství uvolněných plynů je důležitá také kinetika jejich vývoje a časový okamžik uvolnění v procesu tuhnutí kovu. Ze složek formovacích směsí (jader) vykazuje značnou plynotvornost voda, některé minerály, pojiva, organické přísady a další látky.

Jejich únik z místa vzniku do volné atmosféry se projevuje určitým tlakem. Ten je závislý na množství, rychlosti vývinu plynů a odporu kladeným formou. Při vysokých hodnotách tohoto tlaku v blízkosti líce formy může dojít k proniknutí plynů do taveniny v dutině formy a tím ke vzniku plynových dutin v odlitku. [20]

K otázce zvýšené plynotvornosti jader a forem jsem v odborné literatuře mnoho nenašel. Ovšem na internetových stránkách jsem našel článek firmy Keramost s odkazem na Technickou univerzitu v Liberci, která se zabývá problematikou plynotvornosti jader. [15]

Na Technickou univerzitu v Liberci byly odeslány 4 výřezy z jader. Dva vzorky byly z inkriminovaného místa jádra. Další vzorek byl vyřezán z místa, ve kterém se nikdy tato vada neobjevila, a poslední čtvrtý vzorek byl z jádra jiného kotlového článku, které se vyrábí na jiném stroji pro výrobu jader metodou Cold-Box.

5.5.2 Vyhodnocení vzorků jader

Z dodaných výsledků bylo patrné, že ve všech vzorcích z jader je zvýšený vývin plynů při lití. Všechny čtyři vzorky z jádra pro kotlové články vykazovaly skoro 2x vyšší vývin plynů oproti jádrům, které na Technické univerzitě v Liberci již zkoumali na vzorcích z jiných firem. Porovnání se provádělo na vzorcích, které byly vyrobeny metodou Cold-Box.

Celkový objem vývinu plynů na dodaných vzorcích byl po 15 sekundách lití okolo 30 cm^3/g . Dle výsledků z ostatních firem, se hodnota pohybuje jen okolo 16 cm^3/g . Výsledná zpráva potvrdila obavy, že máme na vstřelovacích strojích zvýšenou koncentraci pojiv. Ihned bylo přistoupeno k proměření složek A (vytvrditelná pryskyřice) se složkou B (tvrdidlo). Naměřené hodnoty s výpočtem k podílu ostřiva vykazovaly 0,9%.

Optimální hodnota dle vnitropodnikového DTP (detailního technologického předpisu) a výrobce pojiv je od 0,5 – do 0,7%.

Podle laboratorních vzorků jádra nevykazovala přesycení pojivovými složkami, spíše opak. Okamžitá pevnost v ohybu po vytvrzení se pohybovala v rozmezí hodnot 1,1 – 1,3 Mpa Po 24 hodinách vytvrzení se pohybovala mezi hodnotami 2,2 – 2,4 Mpa.

Optimální hodnota dle vnitropodnikového DTP Viadrus a.s. je v rozmezí okamžitá pevnost v ohybu 1,2 - 2 Mpa a po 24 hodinách vytvrzení 2,5 a výše, což na výsledcích ze vzorků bylo pod přípustnou hranici.

5.6 Optimalizace dávky pojiv na vstřelovacích strojích Cold-Box

Ze zjištěných informací o zvýšené koncentraci složek A i B, bylo přistoupeno ke snížení procentuálních hodnot na vstřelovacích strojích. Nejdříve bylo sníženo dávkování složek A i B na 0,8%.

Byť se snížilo jen 0,1%, jádra takto vyrobená, byla po okamžitém vytvrzení křehká (rozpadala se už při samotné manipulaci v ruce) a tudíž pro výrobu nepoužitelná. Také laboratorní výsledky vykazovaly na vytvrzených zkušebních vzorcích po 24 hodinách ještě nižší pevnost v ohybu od 1,9 – 2,1 Mpa.

Následný postup byl vrátit hodnoty zpět na 0,9 % a oslovit výrobce pojiv, zdali není chyba na jejich straně.

Dodavatel pojiv pro výrobu jader metodou Cold - Box, provedl laboratorní rozbor složek, které se používají při výrobě vstřelování jader. Hodnoty byly v tolerancích, které tato firma garantuje v technickém listu.

Navíc tento dodavatel pojiv pomocí svého obchodního zástupce, zajistil návštěvu v jedné moravské slévárně, kde také dodávají již zmíněné složky, abychom viděli v reálu, že jejich produkt je v pořádku.

Při návštěvě slévárny jsme viděli, že dosahují pevnosti v ohybu od 3,2 – 4 Mpa s procentuálním nastavením složek A i B okolo 0,6%. Následoval popis problému s naší výrobní technologií a při hlubší diskuzi bylo komunikováno, že v jejich slévárně měli v dřívějších letech obdobný problém. Důvod nemáme hledat v pojivovém systému, ale spíše v ostřivu.

5.7 Výměna ostřiva pro výrobu jader metodou Cold-Box

Po návštěvě slévárny byly prezentovány poznatky a informace z diskuze. Během pár dní byla svolána schůze s vedením firmy a nastíněn dlouhotrvající problém s výrobou nejen samotného odlitku U 28 střední, ale i se stoupající tendencí plynových vad v odlitcích. Pro zkoušku snížení těchto vad byla navržena obměna ostřiva jen u výroby metodou Cold-Box, pokud budou výsledky pozitivní, vyzkouší se záměna ostřiva i při výrobě jader metodou Termošok. Po vyhodnocení ekonomických nákladů s touto výměnou a možným přínosem, bylo vedením podniku povoleno tuto zkoušku provést.

5.8 Prezentace výsledků ze zkoušky výměny ostřiva

Výběrové řízení na zkoušku nového křemenného ostřiva vyhrála firma, která má ložisko v Polské republice. Firma garantuje obsah SiO_2 v křemenném ostřivu 99,2% bez větších nečistot a alkálií.

Po dovozu a vstřelení nového druhu křemenného ostřiva do sila pomocí silokamiónů, následovala ihned úprava na vstřelovacích strojích v podobě dávkování pojiva, tvrdidla i katalyzátoru se zástupcem dodavatele ostřiva.

Nastavení složky A i B bylo optimalizováno v poměru 0,65% k podílu ostřiva. Při vytvrzování se také prakticky ihned mohlo snížit cca 40% katalyzátoru. Ve slévárně Viadrus a.s. se používá k okamžitému vytvrzení katalyzátor DMPA (dimetylpropylamin).

Jelikož jedna z jeho záporných vlastností je intenzivní zápach, došlo i ke zlepšení hygienických podmínek na tomto pracovišti. Jádra vyrobená s novým ostřivem ihned vykazovala výbornou pevnost i při tak dosti snížených hodnotách všech složek.

Okamžité pevnosti v ohybu po vytvrzení v měřených vzorcích byly na hodnotě 2,5 – 2,8 Mpa a po 24 hodinách 3,6 – 3,8 Mpa.

Slévárna kotlů při výrobě odlitků používá písková jádra z 98% výroby. Do jednoho kompletu formovacích rámců se vejde cca 2200 kg formovací směsi, ve které je vloženo okolo 110 kg jádrového ostřiva (jader pro odlitky). V poměru ostřivo z jader/ formovací směsi to znamená hodnotu okolo 5%, což představuje zhruba okolo 2,0% nepropáleného jádrového ostřiva, které se postupně vmísí do formovací směsi.

Po měsíci výroby s novými jádry se postupně začaly upravovat také vlastnosti formovací směsi (Tab. 7).

Tab. 7 Průměrné hodnoty formovací směsi za 3 a 4. měsíc 2015

období	3/15	první polovina 4/15	druhá polovina 4/15
vlhkost	3,2	3,2	3
prodyšnost	140	150	160
pevnost v tlaku	245	256	245
spěchovatelnost	30	32	33

6 VYHODNOCENÍ NAVRŽENÉ TECHNOLOGIE

Po dvou měsících výroby jader s novým ostřivem, které je již na hodnotě pojivových složek 0,55%, úpravě vlastností formovací směsi, bylo rozhodnuto o zkoušce výroby kotlového článku U 28 střední z prvotní optimalizace vtokové soustavy, bez průduchového systému.

Zkouška byla provedena na 30 kusech odlitků s výsledkem 1 ks mechanicky poškozen po vytlučení a následném tryskání.

Zbylých 29 ks bylo po tlakové zkoušce bez známek jakýchkoliv průsaků a vad předáno na úsek obrobny.

Momentálně již bylo vyrobeno 582 ks odlitků s neshodnou výrobou 3,8%. Vada „odvařenina od jádra“ se již neobjevila ani v jednom kuse z vyrobených odlitků podle nově nastavené technologie.

Procentuální podíl všech vad způsobených zvýšeným vývinem plynů a nedostatečnou prodyšností formovací směsi (bubliny, odvařeniny, zahlcený plyn, plynové staženiny aj.) se snížily během zkoušeného období cca o 1,2%.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navržení nové technologie lití kotlového článku U 28 střední.

Nejprve byl nastíněn důvod optimalizace vtokové soustavy s popisem jednotlivých vad v kotlovém článku. Dále se přistoupilo k návrhu nového tvaru vtokové soustavy, s kontrolou pomocí numerického simulačního programu Magma 5. 2. - nová technologie fungovala jen 8 měsíců od svého zavedení.

Po 8 měsících funkční technologie, došlo opětovně k nárůstu neshodné výroby. Hledaly se možné příčiny a důvody vad a její následné odstraňování.

Úprava samotného jádra pomocí navrtání pomohla eliminovat neshodnou výrobu tohoto kotlového článku. Avšak celkově se zvětšující problémy s formovací směsí a vzrůstající zmetkovitostí při výrobě ostatních kotlových článků bylo důvodem k hledání nových alternativ.

Interní záznamy technologických vlastností formovací směsi poukázaly na stále zhoršující se trend v prodyšnosti směsi.

U většího podílu plynových vad v odlitcích bylo navrženo a doporučeno snížení dávky pojiva a tvrdidla při výrobě jader. Snížení dávek pojiva a tvrdidla nešlo kvůli různým aspektům docílit, proto další návrh spočíval v obměně ostřiva jádrových směsí pro výrobu metodou Cold - Box.

Až samotná výroba jader na vyměněné ostřívo, přinesla konečně kýžený úspěch s výrobou odlitku U 28 střední. Vliv nového jádrového ostřiva přinesl také do formovací směsi vzrůstající trend prodyšnosti a celkové ustálení technologických hodnot směsi.

Lze usoudit, že slévárenství patří mezi obor, u kterého nelze spoléhat jen z naučených poznatků z odborné literatury, ale je zapotřebí také mít tzv. technologický cit, který se musí naučit každý sám z praxe.

Také při zkoumání spektra vad je zapotřebí si projít všechny faktory, které by mohly ovlivnit celkovou výrobu a ne se jen upínat na jediný technologický proces výroby.

Navržená technologie přinesla nejen úsporu v podobě snížení vnitřní neshodné výroby při výrobě kotlového článku U 28 střední, ale také na ostatních odlitcích, které má ve svém portfoliu slévárna Viadrus a.s.

Vada „odvařenina od formy, jádra“ se již neobjevila na žádném odlitku.

Procentuální podíl celkové vnitřní neshodné výroby slévárny kotlů od dubna 2015 spadl z celkových 8,5% na 7,4%, což je z hlediska finančních nákladů částka převyšující statisíce Kč.

Risk ve smyslu obměny ostřiva nám zajistil velmi kladné výsledky, a proto v budoucnu budeme pokračovat v dalším zapracovávání nového ostřiva ve výrobě.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*, Vysoké učení technické v Brně, 1998. ISBN 80-214-1263-1
- [2] VONDRÁK, Vladimír; PAVELKOVÁ, Alena; HANUS, Aleš. *Metalurgie litin: Vtokové soustavy a nálitkování*. Ostrava: VŠB-TUO, 2005. 101 s.
- [3] BEELEY, P.: *Foundry Technology*, Butterworth - Heinemann, Oxford 2001, ISBN 0-7506-4567-9
- [4] JELÍNEK, P. *Slévárenství*. Ostrava: VŠB-TUO, 2010. 255 s.
- [5] ELBEL, T. a kol. *Vady odlitků ze slitin železa*, 1. Vyd. MATECS, Brno, 1992.
- [6] ELBEL, T.; ŠENBERGER, J.; KOCIÁN, L.; ZÁDĚRA, A. *Studium reoxidace kovů ve slévárenské formě, Slévárenství*, č. 10-11, 2006, s. 394-399.
- [7] BECHNÝ, Lubomír a Stanislav VRÁBEL. *Filtrácia materiálov na odliatky*. Žilinská univerzita v Žilině: EDIS, 2000. ISBN 80-7100-672-6.
- [8] BEŇO, Jaroslav a ŠPIRUTOVÁ. VŠB TUO. *Počítačová podpora liti a tuhnutí odlitků* [online]. První vydání. Ostrava, 2013 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z:http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/07_Pocitacova_podpora_liti_a_tuhnuti_odlitku/Beno_Pocitacova_podpora_liti_a_tuhnuti_odlitku.pdf
- [9] JELÍNEK, P. *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí*. 1. vydání. Ostrava, 2004. 241 s. ISBN 80-239-2188-6.
- [10] SKOČOVSKÝ, Petr; PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Grafitické liatiny*, Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2005. 168 s. ISBN 80-8070-390-6.
- [11] VONDRÁK, Vladimír; HAMPL, Jiří; HANUS, Aleš. *Metalurgie litin: Mimopecní zpracování roztavené litiny*. Ostrava: VŠB-TUO, 2005. 136 s.
- [12] GEDEONOVÁ, Zora; JELČ, Imrich. *Metalurgia liatin*, Košice: HF TU Košice, 2000. 288 s. ISBN 80-7099-516-5.

- [13] PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK a Přemysl RYŠ. *Nauka o materiálu: Nauka o kovech - 4. svazek, Železo a jeho slitiny*. 2. vyd. Praha: ACADEMIA, nakladatelství Československé akademie věd, 1975, 544 s.
- [14] ESI Group: FEM - FDM. [online]. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.delcam-ural.ru/files/R007%20FEM-FDM.pdf>
- [15] Keramost: 18. Bentonitová konference. [online]. [cit. 2015-04-2]. Dostupné z: <http://www.keramost.cz/cz/aktuality/-/18-bentonitova-konference>
- [16] Marinczek, B, Giesserei 71, č. 15, s. 588, 1984
- [17] OTÁHAL, V. *Jakostní litiny: Litina s lupínkovým grafitem*, Dostupné z: http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Jakostni_litiny_vytah.pdf
- [18] Cvičení odlitek. In: [online]. [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/cvic_odlitek.pdf
- [19] ASK CHEMICALS. *COLD BOX PROCESS* [online]. [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.ask-chemicals.com/foundry-products/products/pu-cold-box-binder/cold-box-process.html>
- [20] MACHUTA, Jiří a Jan DOBEŠ. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Posouzení plynotovorností jádrových směsí typu Cold Box: Odborný interní posudek pro Viadrus a.s., Liberec*, 2015.
- [21] CAREY, P; ARCHIBALD, J. *Sand Binder Systems Part X-The Phenolic Urethane Amine Cold Box Systems*. Foundry managment & technology. 1995, 12, s. 21-26.
- [22] HÄNCHEN, R. *Dauerfestigkeitsbilder für Stahl und Gusseisen*. Carl Hanser Verlag, München, 1963.
- [23] BONOLLO, F.; ODORIZZI, S. *Numerical Simulation of Foundry Processes*. 1st ed. Padova: S.G.E. , 2001, 264 p. ISBN 88-86281-63-3.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Rovnovážný diagram Fe - C ----- Fe - Fe₃C
- Obr. 2 Vliv podchlazení na krystalizaci litiny
- Obr. 3 Ovlivnění poloh Ts a T_M přítomností prvků v litině
- Obr. 4 Tvar grafitu v litinách, hluboké leptání, REM
- Obr. 5 Řez ternární soustavou Fe – C – Si pro obsah 2,5% Si
- Obr. 6 Mikrostruktury litiny s lupínkovým grafitem
- Obr. 7 Strukturní diagramy podle Uhlitsche a Weichelta
- Obr. 8 Vtoková soustava odlitku
- Obr. 9 Odvařenina od formy, jádra
- Obr. 10 Síť generovaná metodou FDM
- Obr. 11 Síť generovaná metodou FEM
- Obr. 12 Kotlový článek s původní vtokovou soustavou a vyznačenými místy výskytu vad
- Obr. 13 Znázorněný průběh lití pomocí trasovacích bodů
- Obr. 14 Kotlový článek s enormním počtem výfuků
- Obr. 15 Zůstatek plynů v dutině formy po odlití
- Obr. 16 Princip algoritmu Solver 5
- Obr. 17 Vygenerovaná síť
- Obr. 18a Nastavení požadovaných kritérií k výpočtu - plnění
- Obr. 18b Nastavení požadovaných kritérií k výpočtu - tuhnutí a chladnutí odlitku
- Obr. 19 Teplota v odlitku před a po optimalizaci
- Obr. 20 Odvzdušnění kotlového článku před a po optimalizaci
- Obr. 21 Kupolová pec s indukčním předpecím
- Obr. 22 Stroje pro výrobu jader metodou Cold-Box
- Obr. 23 Druhy katalyzátorů
- Obr. 24 Gravitační lití odlitků

Obr. 25 Kotlový článek s vyznačeným místem výskytu vady

Obr. 26 Výskyt nové vady v kotlovém článku

Obr. 27 Nově navržené vtokové soustavy

Obr. 28 Přípravek pro navrtání průduchového systému v jádře

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hodnoty součinitele – s

Tab. 2 Porovnání výpočtu se skutečností

Tab. 3 Vstupní data potřebné k výpočtu simulace

Tab. 4 Upravené chemické složení litiny s lupínkovým grafitem EN-GJL-150

Tab. 5 Vyjádření neshodné výroby před a po úpravě vtokové soustavy

Tab. 6 Průměrné měsíční hodnoty formovací směsi

Tab. 7 Průměrné hodnoty formovací směsi za 3 a 4. měsíc 2015